



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

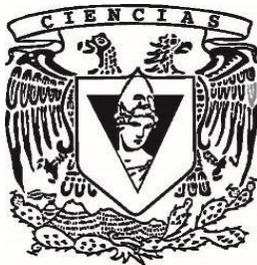
**Evaluación de la calidad de siete suelos artificiales por  
medio de rasgos funcionales y la productividad de frijol  
(*Phaseolus vulgaris* L.)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA**

**P R E S E N T A :**

**YESENIA PAZ ELIZALDE**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**DOCTOR VÍCTOR MANUEL PEÑA RAMÍREZ**

**Ciudad Universitaria, CD. MX., 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**1. Datos del alumno**

Paz  
Elizalde  
Yesenia  
yeseniapaz@ciencias.unam.mx  
Universidad Nacional autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
5584953052

**2. Datos del tutor**

Dr.  
Víctor Manuel  
Peña  
Ramírez

**3. Datos del sinodal 1**

Dra.  
Silke  
Cram  
Heydrich

**4. Datos del sinodal 2**

Dra.  
Blanca Lucía  
Prado  
Pano

**5. Datos del sinodal 3**

Dra.  
Lucy Natividad  
Mora  
Palomino

**6. Datos del sinodal 4**

Mtra.  
Ana Karen  
Vázquez  
Segovia

**7. Datos del trabajo escrito**

Evaluación de la calidad de siete suelos artificiales por medio de rasgos funcionales y la productividad de frijol (*Phaseolus vulgaris* L).

## **Agradecimientos**

A la universidad por ser mi abrigo a lo largo de estos ocho años y por los conocimientos forjados durante todo el proceso. Agradezco también por todas las oportunidades que me ha brindado y por las personas que he tenido la fortuna de conocer pues me han impregnado de su amor por la ciencia y la difusión de esta.

A la facultad de Ciencias por ser mi segunda casa, por agrandar mi interés por las Ciencias de la Tierra y definir mi camino. Por enseñarme que aún falta mucho por trabajar y una inmensidad por descubrir, pero que por algo se empieza. Por los excelentes profesores y las gratas experiencias que me ha brindado.

Al proyecto DGAPA-PAPIIT IN108118 “Construcción y monitoreo de tecnosuelos con materiales de desecho para la revegetación urbana” por el financiamiento para la investigación y la beca otorgada.

Al Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM y al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad y todo el personal que ambas instituciones por permitirme realizar en sus instalaciones todos los análisis requeridos y por la disposición que todo momento me fue proporcionada.

A la Doctora Blanca Prado por el gran apoyo brindado desde el principio del proyecto, por sus conocimientos brindados, por las charlas y la retroalimentación para la mejora del proyecto. Por su actitud positiva, su buen humor y por trasmitirme su amor a la edafología.

A la Doctora Lucy Mora por sus conocimientos brindados y abrirme las puertas en su laboratorio y en el taller de investigación. Agradezco también por permitirme realizar el servicio social con ella y todo el apoyo.

A la Doctora Silke Cram por el apoyo en la revisión de este documento y por sus grandes aportaciones. Además de todos los conocimientos que nos compartió en clases y las prácticas de campo, de las cuales tengo gratos recuerdos.

A la Maestra Ana Karen Vázquez por toda la ayuda recibida, por la dedicación con la que contribuyó a mejorar este escrito y los comentarios tan acertado que me

ayudaron a tener un mejor entendimiento de los rasgos funcionales. Por estar siempre en la disponibilidad de ayudar y haberme brindando una amistad tan bonita.

Al Doctor Peña por la infinita paciencia que me brindó para la realización de esta tesis, por siempre estar en la disposición de apoyarme y contagiarme de su profundo interés por los suelos y las plantas, por darme la oportunidad de conocer a excelentes personas y alentarme a siempre aprender cosas nuevas.

A la Doctora Julieta Rosell por tanto, por introducirme de la forma más amable a un campo de conocimiento que no pensé que me interesaría tanto, por recibirme en su equipo de trabajo de la manera más cordial e incluirme en sus proyectos, por darme la oportunidad de ir a mi primer congreso. Por su apoyo y ayuda incondicional en todo momento, por las reuniones con el Doctor Víctor y Diego donde siempre aclaraba nuestras dudas y por todo el conocimiento adquirido en ellas. Agradezco también por la entera disposición que tuvo en ayudarme y el interés que siempre mostró para la realización de este trabajo. Por nunca construir una barrera, sino un puente con todos los que te rodeamos.

A Lupita por apoyarme desde el primer momento en que llegué al LANCIS y hasta ahora, por la paciencia que siempre tuvo hacía mí. Por las horas compartidas durante el transporte de regreso a casa, por brindarme su apoyo en todos los sentidos y compartirme de sus experiencias para que la carga fuera menos pesada. Por todas las risas y los momentos en común, por sus consejos y por contagiarme siempre de su buen humor que tanto la caracteriza.

A Diego, por siempre estar en la entera disposición de ayudar, por su amabilidad y por todo el apoyo que me brindó para la realización de este trabajo. Por las largas horas que pasó explicándome cómo realizar códigos y ayudándome al análisis de mis datos. Agradezco su empatía, su apoyo y también su amistad brindada.

Al equipo de LANCIS, Noemí, Karen, Lupita, Diego, Pablo, Andrea y Óscar, por los seminarios compartidos, el intercambio de ideas, las charlas, las comidas, las risas y los comentarios de retroalimentación que siempre resultaban acertados. Por su calidez y la gran amistad que logramos entablar.

A las excelentes personas que tuve la fortuna de conocer en la carrera, Paola, Sarita, Gibrán, Marí, gracias por ayudarme siempre y alentarme a crecer en lo académico y como persona. Por las prácticas de campo, por brindarme su amistad, por su ayuda en los momentos más difíciles, en donde creía que podía hacerlo y aun así siempre estuvieron allí para alentarme. Gracias también a Gaby, Elisa, Diana y a todos aquellos con los que tuve el placer de convivir y tener gratas experiencias.

## **Dedicatorias**

A mi mamá por el gran esfuerzo que ha hecho por mis hermanos y por mi desde que papá no está, por su entrega y el coraje de nunca darse por vencida, por dedicarnos su vida y darnos un gran ejemplo. Por alentarnos siempre a ser mejores personas y lograr lo que nos propongamos. Este logro también es suyo, porque no lo hubiera logrado sin ella.

A mi papá, porque a pesar de no estar con nosotros físicamente desde hace ya 14 años, aún sigue siendo una motivación para seguir dando lo mejor de mí. Esto también va por él y se lo dedico donde quiera que se encuentre, porque estoy segura que sigue pendiente de mí.

A mi hermano Cris que quiero tanto, por dar siempre lo mejor. Por todos los sacrificios que ha tenido que hacer por nosotras, por siempre escucharme y alentarme, por la confianza que tenemos que jamás caduca, por las charlas sanadoras y las palabras mágicas que emite, por los abrazos sinceros y por ser el mejor hermano mayor que pudo haberme tocado.

A mi güera Pawis, por ser la primera persona de la Facultad en arroparme con una sonrisa y ofrecerme su amistad sincera, por ayudarme tanto en la carrera y enseñarme cosas nuevas, sé que nada de esto habría sido sin ella. Por todos los recuerdos y las vivencias, por su risa contagiosa, por sus mándalas y su forma tan bonita de vivir la vida.

A mi gran amiga Liliana, por conservar nuestra amistad después de 9 años, por incluirme en su familia y alentarme siempre a crecer como persona. Por nunca

soltarme, por apoyarme en las situaciones difíciles y estar en el momento exacto. Por los viajes juntas y las pláticas motivadoras, por los planes de ser mejores cada día, por todos los momentos compartidos, por todo.

A Luis, por brindarme apoyo desde siempre, por las horas de desvelo en donde me acompañó, por alentarme a seguir y no tirar la toalla; por ser participé de mis triunfos y consolarme en los fracasos; por cuidarme en los momentos difíciles y siempre ayudarme a buscar la manera de salir. Por ser mi sostén y motivarme cuando ni yo encontraba los motivos. Por el amor, el tiempo, las risas, nuestros momentos, por la tranquilidad que siempre me transmiten sus ojos.

## **Glosario de términos**

ACP: Análisis de componentes principales  
ACV: Análisis de componentes de la varianza  
AFE: Área foliar específica  
ANOVA: Análisis de varianza  
ASE: Área superficial específica  
BC: Biocarbón/Biochar  
BH: Biomasa de hojas  
BTo: Biomasa total  
BR: Biomasa de raíz  
BS: Biomasa de semillas  
BT: Biomasa de tallo  
BV: Biomasa de vainas  
BVS: Biomasa de vainas y semillas  
CC: Capacidad de campo  
CE: Conductividad eléctrica  
CFMS: Contenido foliar de masa seca  
CIC: Capacidad de intercambio catiónico  
CP: Componente principal  
DA: Densidad aparente  
CRMS: Contenido radical de masa seca  
dCC: Capacidad de retención de agua disponible  
DR: Densidad real  
DTF: Densidad del tejido foliar  
DTF: Densidad del tejido foliar  
DTR: Densidad del tejido radical  
Esp: Espesor de la hoja  
GEI: Gases de efecto invernadero  
LR: Longitud radical  
LRE: Longitud radical específica  
LT: Longitud del tallo  
MO: Materia orgánica  
NV: Número de vainas  
PT: Porosidad total del suelo  
RSU: Residuos sólidos urbanos

## Índice de figuras

Figura 1. Croquis del diseño experimental.	22
Figura 2. Composición de los diferentes residuos empleados en los Tecnosoles.	23
Figura 3. Modelo del ANOVA de la altura de las plantas.	38
Figura 4. Modelo del ANOVA del diámetro de las plantas.	39
Figura 5. Modelo del ANOVA de la cobertura de las plantas.	41
Figura 6. Modelo del ANOVA de la biomasa total.	42
Figura 7. Gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa de las plantas y suelo, componente 1 y 2.	45
Figura 8. Gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa de las plantas y suelo, componentes 1 y 3.	46
Figura 9. Modelo del ANOVA de la biomasa de vainas.	48
Figura 10. Modelo del ANOVA de biomasa de semillas.	50
Figura 11. Modelo del ANOVA de número de vainas.	52
Figura 12. Gráfica del análisis de componentes principales de las variables de productividad y suelo. Componentes 1 y 2.	56
Figura 13. Gráfica del análisis de componentes principales de las variables de productividad y suelo. Componentes 1 y 3.	57
Figura 14. Modelo del ANOVA del espesor de la hoja.	65
Figura 15. Modelo del ANOVA del área foliar específica.	67
Figura 16. Modelo del ANOVA de la densidad del tejido foliar.	69
Figura 17. Modelo del ANOVA de la densidad del tejido radical.	71
Figura 18. Modelo del ANOVA de la longitud radical específica.	73
Figura 19. Modelo del ANOVA del contenido radical de masa seca.	74
Figura 20. Modelo del ANOVA del área superficial específica.	76
Figura 21. Gráfica del análisis de componentes principales 1 y 2 de rasgos funcionales.	79
Figura 22. Gráfica del análisis de componentes principales 1 y 3 de rasgos funcionales.	80
Figura 23. Gráfica del análisis de componentes principales 1 y 2 de rasgos funcionales y suelo.	84
Figura 24. Gráfica del análisis de componentes principales 1 y 3 de rasgos funcionales y suelo.	85

Figura 25. Comportamiento de la altura, cobertura y diámetro de las plantas a lo largo de 4 tiempos de medición. 118

Figura 26. Modelo del ANOVA del contenido foliar de masa seca 120

## Índice de cuadros

Cuadro 1. ANOVA y prueba de Tukey de la altura.	37
Cuadro 2. ANOVA y prueba de Tukey del diámetro del tallo.	43
Cuadro 3. ANOVA y prueba de Tukey de la cobertura.	40
Cuadro 4. ANOVA y prueba de Tukey de la biomasa total.	42
Cuadro 5. Porcentaje de variación de las variables de crecimiento, biomasa y variables de suelo.	43
Cuadro 6. Cargas estandarizadas del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y propiedades edáficas	44
Cuadro 7. ANOVA y prueba de Tukey de la biomasa de vainas y semillas.	47
Cuadro 8. ANOVA y prueba de Tukey de biomasa de semillas.	49
Cuadro 9. ANOVA y prueba de Tukey de número de vainas.	51
Cuadro 10. ANOVA y prueba de Tukey de número de nódulos.	53
Cuadro 11. Porcentaje de variación las variables productividad y de suelo.	54
Cuadro 12. Cargas estandarizadas del análisis de componentes principales de las variables productividad y suelo.	55
Cuadro 13. Evaluación de la calidad de los Tecnosoles y desempeño de las plantas de frijol.	63
Cuadro 14. ANOVA y prueba de Tukey del espesor de la hoja.	65
Cuadro 15. ANOVA y prueba de Tukey del área foliar específica.	66
Cuadro 16. ANOVA y prueba de Tukey de la densidad del tejido foliar.	68
Cuadro 17. ANOVA y prueba de Tukey de la densidad del tejido radical.	70
Cuadro 18. ANOVA y prueba de Tukey de la longitud radical específica.	72
Cuadro 19. ANOVA y prueba de Tukey del contenido radical de masa seca.	74
Cuadro 20. ANOVA y prueba de Tukey del área superficial específica.	75
Cuadro 21. Porcentaje de variación entre rasgos funcionales.	77

Cuadro 22. Cargas estandarizadas del análisis de componentes principales de rasgos funcionales..	77
Cuadro 23. Porcentaje de variación entre rasgos funcionales y suelo.	82
Cuadro 24. Cargas estandarizadas del análisis de componentes principales de rasgos funcionales y suelo.	83
Cuadro 25. Fraccionamiento de metales pesados en los residuos individuales empleados.	114
Cuadro 26. Propiedades físicas y químicas de los 7 tratamientos.	115
Cuadro 27. Elementos totales contenidos en los 7 tratamientos.	116
Cuadro 28. ANOVA del contenido foliar de masa seca.	119

## Contenido

<b>I. Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>II. Introducción .....</b>	<b>2</b>
2.1 El suelo y su importancia como recurso no renovable .....	4
2.2 La importancia de los Tecnosoles.....	5
2.3 Propiedades que deben tener los suelos artificiales para permitir el crecimiento vegetal .....	7
2.3.1 Nutrimientos esenciales para el crecimiento de las plantas .....	7
2.3.2 Capacidad de retención de agua .....	9
2.3.3 Densidad aparente.....	9
2.3.4 Acidez y alcalinidad .....	10
2.3.5 Salinidad .....	11
2.4 Generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México.....	11
2.5 Residuos urbanos (orgánicos e inorgánicos) con potencial de ser empleados en la elaboración de Tecnosoles .....	12
2.5.1 Residuos relacionados con la industria de la construcción.....	12
2.5.2 Residuos orgánicos (compostas).....	12
2.5.3 Compostas.....	13
2.5.4 Residuos orgánicos (Biocarbón) .....	15
2.6 Rasgos funcionales en plantas como indicadores de desempeño.....	16
2.7 Importancia del frijol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) en México .....	18
<b>III. Objetivos .....</b>	<b>19</b>
3.1 Objetivo general .....	19
3.2 Objetivos particulares.....	19
<b>IV. Hipótesis .....</b>	<b>20</b>
<b>V. Métodos.....</b>	<b>21</b>
5.1 Diseño experimental .....	21
5.2 Análisis físicos y químicos del suelo .....	24
5.2.1 Densidad Aparente (DA).....	25
5.2.2 Densidad Real (DR).....	25

5.2.3	pH y conductividad eléctrica (CE) .....	26
5.2.4	Nutrientes (C, N, P, K, Ca y Mg) .....	26
5.3	Crecimiento de frijol .....	28
5.4	Productividad .....	28
5.4.1	Biomasa de vainas y semillas, y número de vainas por planta .....	29
5.5	Medición de rasgos funcionales de las plantas de frijol .....	29
5.5.1	Rasgos funcionales de hojas .....	30
5.5.2	Rasgos funcionales de raíz .....	32
5.6	Análisis estadísticos .....	34
<b>VI.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>36</b>
6.1	Análisis del crecimiento y la productividad de las plantas de frijol. ....	36
6.1.1	Altura .....	36
6.1.2	Diámetro del tallo .....	38
6.1.3	Cobertura de la planta .....	40
6.1.4	Biomasa total (BTo) .....	41
6.2	Análisis de Componentes Principales de las variables de crecimiento y biomasa .....	43
6.3	Productividad de <i>Phaseolus vulgaris</i> L. ....	46
6.3.1	Biomasa de vainas (BV) .....	47
6.3.2	Biomasa de semillas (BS) .....	48
6.3.3	Número de vainas (NV) .....	50
6.4	Análisis de Componentes Principales de la productividad y las propiedades físicas y químicas del suelo .....	53
6.5	Análisis de Rasgos funcionales.....	64
6.5.1	Rasgos funcionales de hojas .....	64
6.5.2	Rasgos funcionales de raíces .....	69
6.5.3	Análisis de Componentes Principales de Rasgos Funcionales .....	76
6.5.4	Análisis de Componentes Principales de Rasgos funcionales y propiedades físicas y químicas de suelo .....	80
<b>VII.</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>86</b>
7.1	Suelos artificiales recomendados para su uso en azoteas o áreas verdes rehabilitadas.....	86

7.2 Principales limitantes de los Tecnosoles recomendados por sus propiedades edáficas y desempeño de plantas para el cultivo de frijol .....	94
7.3 Análisis de rasgos funcionales .....	96
7.3.1 Relación entre rasgos de diferentes órganos .....	98
<b>VIII. Conclusiones .....</b>	<b>102</b>
<b>IX. Referencias .....</b>	<b>104</b>
<b>X. Anexos .....</b>	<b>113</b>
Anexo 1 .....	113
Anexo 2 .....	114
Anexo 3 .....	116
Anexo 4 .....	119

## I. Resumen

La Ciudad de México contribuye con menos del 1% de la productividad agrícola del país, siendo la agricultura urbana una alternativa para mejorar la producción de alimentos. Sin embargo, en este sistema frecuentemente se emplea suelo fértil que es extraído de los bosques que circundan la ciudad, sin considerar que el suelo es un recurso natural no renovable a escala humana. En este estudio se propone utilizar residuos urbanos con la finalidad de diseñar Tecnosoles que cumplan con la función de dar soporte, y aporten suficientes nutrimentos y agua disponible para las plantas. En el experimento se implementaron siete tratamientos con diferentes fracciones de materia orgánica (composta, lombricomposta, biocarbón y trozos de madera) e inorgánica (residuos de construcción y excavación). La calidad de los Tecnosoles se evaluó por medio del crecimiento y la productividad del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), mediante 8 rasgos funcionales de hojas y raíces. Los ANOVAs mostraron diferencias significativas en la mayoría de las variables analizadas, indicando una fuerte influencia de los Tecnosoles en el desarrollo de las plantas. De manera general, los tratamientos con lombricomposta tuvieron mejores rendimientos en comparación con los tratamientos en los que se aplicó composta y biocarbón. Sin embargo, el tratamiento 4 (30% residuos de construcción, 25% composta, 20% biocarbón y 25% trozos de madera) fue el más recomendado por su buena calidad y su posible baja emisión de gases de efecto invernadero. Nuestros resultados sugieren que los Tecnosoles pudieron cumplir con las funciones de dar soporte y favorecer el cultivo de las plantas de frijol, siendo una opción viable para evitar la extracción de suelo natural.

## II. Introducción

En la Ciudad de México se concentran importantes actividades políticas, económicas, sociales y culturales. Esto ha traído consigo un acelerado crecimiento poblacional que actualmente asciende a cerca de 9 millones de personas. Los asentamientos urbanos que se han establecido se caracterizan por ser poco planificados e irregulares. No obstante, dentro de la ciudad existen 11,289 hectáreas de áreas verdes (camellones, jardines, parques y reservas ecológicas) y fuera de ella, una zona de conservación que abarca más de la mitad de la superficie total de la entidad (87,291 hectáreas, 59% del territorio) (Meza y Moncada, 2010). Esta zona de conservación incluye bosques, pastizales, humedales y 22,800 hectáreas de zonas agrícolas. En conjunto, las áreas verdes brindan diversos servicios ecosistémicos como la regulación local del clima, la biodiversidad, la fijación de carbono, la producción de oxígeno, la estabilidad de los suelos, la filtración de agua y la recarga del acuífero (57% del agua que se consume en la ciudad proviene de pozos). Además de producir diversos cultivos agrícolas (e.g. la Ciudad de México es la principal productora de nopal y romeritos en México). Desafortunadamente, el crecimiento desmedido de la ciudad y su zona conurbada ha sometido a las áreas de conservación y sus recursos naturales a una fuerte presión que trae consigo importantes impactos en el ambiente urbano, el principal es la generación y difusión masiva de desechos urbanos (Zhang, 2005).

Un impacto que ha afectado seriamente a la Ciudad de México es el sellamiento con pavimento y concreto de los suelos (33.3% de la superficie), dejando de cumplir por completo sus funciones ecológicas (e.g. regulación del clima por medio de la evaporación). Incluso en la zona de conservación, los suelos enfrentan serios problemas de degradación debido a la falta de un manejo forestal adecuado, la tala clandestina, el cambio de uso de suelo a habitacional, el sobrepastoreo, las inadecuadas prácticas agrícolas y particularmente en este estudio, nos interesa la extracción de lo que comúnmente se conoce como “tierra negra” (horizonte orgánico) y “tierra de hoja” (mantillo), o “tierra de monte” (horizonte orgánico y mantillo), empleadas ampliamente en la jardinería y viveros tradicionales (Molla, 2006). La “tierra de monte” es el producto maderable no forestal más importante de México y que ha sufrido saqueos constantes, tan solo en 2003 se extrajeron 161

763 toneladas en todo el país, siendo la Ciudad de México la entidad que más tierra extrajo con 102 467 toneladas (Tapia-Tapia y Reyes Chilpa, 2008). Es un asunto importante de interés pues estamos agotando un recurso natural no renovable a corto plazo, si consideramos que en promedio se requieren entre 400 a 1000 años para formar un centímetro de suelo.

Para evitar una mayor degradación de la zona de conservación, además de prohibir la extracción de suelo forestal, es necesario desarrollar Tecnosoles que realicen las funciones de los suelos naturales y además sean de bajo costo. En la Ciudad de México se calcula que diariamente se generan cerca de 6 mil toneladas de residuos sólidos domésticos, de los cuales 40.8% son residuos alimenticios y de jardinería (JICA/GDF, 1999). Estos residuos orgánicos son procesados en diversas plantas para producir composta y lombricomposta (Rascón, 2002; Herrera *et al.*, 2008), la más importante se localiza en Bordo Poniente. Por otra parte, diariamente se producen 3,000 toneladas de residuos provenientes de la excavación, construcción y demolición de inmuebles (Castillo-Berthier, 2002). La disposición de estos residuos puede generar impactos ambientales negativos, como la destrucción de la vegetación y la pérdida de servicios ecosistémicos. No obstante, estos residuos poseen nutrimentos esenciales (Ca, Mg, Fe, Cu, y Zn), por lo que pueden mezclarse con los residuos orgánicos para elaborar Tecnosoles que pudieran emplearse en la producción agrícola urbana, o en la restauración de jardines domésticos, camellones y parques urbanos.

En este estudio se pretende analizar la viabilidad de emplear residuos urbanos orgánicos e inorgánicos, en la elaboración de Tecnosoles que cumplan las funciones de dar sostén, aportar nutrimentos y retener suficiente agua disponible, de tal forma que plantas comestibles puedan sobrevivir, crecer y fructificar en las áreas verdes de la Ciudad de México. La especie seleccionada para analizar su crecimiento y productividad sobre 7 Tecnosoles, es el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). De esta forma, se promovería la agricultura sostenible y la producción de alimentos en la propia ciudad (agricultura urbana) y se evitaría el consumo de suelo forestal.

## 2.1 El suelo y su importancia como recurso no renovable

Los suelos son sistemas complejos conformados por componentes físicos, químicos y biológicos que interactúan de manera autoorganizada (Young y Crawford, 2004). La formación de éstos es un proceso ecológico que resulta de las interacciones de factores que incluyen el clima, los organismos, el material parental, la topografía y el tiempo en que el material parental se convierte en partículas minerales del suelo (Jenny, 1941). Los servicios ecosistémicos que proporcionan los suelos son el resultado de propiedades inherentes y manejables (Dominati *et al.*, 2010) que se definen como todos los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Como componentes principales de los ecosistemas terrestres, los suelos cumplen una serie de funciones de vital importancia (Comisión Europea, 2010), como favorecer el crecimiento de las plantas (reservorio de nutrientes y agua, así como el soporte de raíces), es por ello que la degradación del suelo es considerada como el principal problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos (PNUMA, 2000; Cram *et al.*, 2008). Otras de las funciones de los suelos es mantener la reserva de biodiversidad (hábitats, especies y genes), filtración y transformación de sustancias (carbono, agua, nutrimentos, contaminantes), almacenamiento de sustancias (carbono, nutrimentos), fuente de materias primas, apoyo físico y cultural de las actividades humanas (hábitat, transporte, paisaje, eliminación de desechos, transporte de energía y agua) y archivo del patrimonio geológico y cultural (Cram *et al.*, 2008).

El suelo, además constituye el medio donde se realiza una parte de los ciclos biogeoquímicos necesarios para el ciclaje de los compuestos orgánicos; se estima que el contenido de carbón almacenado en el primer metro del suelo es 1.5 veces mayor a aquél acumulado en la biomasa (Sombroek *et al.*, 1993), constituyendo la tercera fuente más importante de carbón (Lal, 1995). Otras funciones no menos importantes, son captar el agua que permite la recarga de los acuíferos, lo que influye en su calidad, filtrando, amortiguando y captando ciertos contaminantes, impidiéndoles llegar a las reservas de agua (Brady y Weil, 1999). El suelo contribuye indirectamente a modular la temperatura y la humedad, lo cual mejora la calidad del

aire (evitando polvaredas y/o favoreciendo la producción de oxígeno), factores relacionados con la calidad de vida (Cram, *et al.*, 2008).

Son numerosos los beneficios que el suelo proporciona, sin embargo, debe tenerse en cuenta que es un recurso finito ya que su pérdida y degradación no son reversibles en el curso de una vida humana (se requieren entre 400 a 1000 años para formar un centímetro de suelo). Los suelos enfrentan serios problemas de degradación causados por usos y prácticas de manejo insostenibles y por fenómenos climáticos extremos resultantes de diferentes factores sociales, económicos y de gobernanza (FAO, 1998). Entre los problemas a los que nos referimos, se encuentra la extracción de suelo, es decir, la extracción de los horizontes de origen mineral y orgánico acumulados sobre terrenos forestales, a los cuales se les conoce comúnmente como “tierra negra” y al material superficial, proveniente de la acumulación de material orgánico de la vegetación forestal, con bajo grado de descomposición (mantillo), al cual se le conoce como “tierra de hoja” (SEMARNAT, 2000). La extracción de suelo y mantillo es una práctica que se ha ido incrementado en las últimas décadas (SEMARNAT 1996), principalmente por la demanda que se genera en viveros, establecimiento de jardines, parques y en general en áreas verdes. El aprovechamiento irracional de este recurso provoca serios problemas al ecosistema, por la erosión y pérdida de la productividad del suelo en las áreas donde se extraen estos materiales, mermando su aptitud preferentemente forestal.

## 2.2 La importancia de los Tecnosoles

La identificación y clasificación de los Tecnosoles es un tema de estudio emergente, con propuestas parciales. La World Reference Base (Rossiter, 2007; IUSS Working Group WRB, 2006; Efland y Pouyat, 1997) incorporó en su sistema de clasificación dos tipos de suelos de origen antrópico, los Antrosoles: suelos agrícolas modificados profundamente por actividades humanas, debido a adiciones de materia orgánica y residuos; y los Tecnosoles que contienen en al menos 20% de su volumen materiales artificiales, denominados artefactos, dentro de los primeros 100 cm del perfil.

El término Tecnosol se emplea frecuentemente para designar a los suelos desarrollados dentro de ciudades. Sin embargo, los suelos influenciados por el hombre también se encuentran en otros lugares donde la actividad humana ha modificado fuertemente los suelos y es su principal factor de formación y evolución (Morel, 2015). Los Tecnosoles o suelos artificiales son suelos jóvenes que presentan procesos pedogenéticos incipientes y carecen de estructura, a menudo están conformados por materiales de desecho (orgánicos, inertes y/o tóxicos), escombros de construcción, materiales dragados o relleno de tierra y son utilizados como relleno para propósitos de nivelación (Lehmann y Stahr, 2007; Testiati *et al.*, 2013, Nehls *et al.*, 2013; Cuossy, 2016). Existen también los denominados “Tecnosoles construidos”, a diferencia de lo mencionado anteriormente, en estos suelos se pueden usar residuos diferentes y complementarios para hacer un suelo específico y diseñado (Technosol, Grupo de Trabajo IUSS WRB, 2015), con el objetivo de crear suelos aptos para el desarrollo de plantas que promueven diferentes procesos biogeoquímicos y edáficos (Macías, 2004; Macías *et al.*, 2001; Santos, 2019).

Los Tecnosoles tienden a ser alcalinos y en algunos casos pueden estar contaminados con metales pesados y derivados del petróleo, o pueden poseer propiedades físico-mecánicas particulares tales como alta compactación, condiciones que en conjunto limitan la aireación, el drenaje, el almacenamiento de agua disponible para las plantas y el crecimiento de las raíces. (Stroganova y Agarkova, 1993; Jim, 1998; Stroganova y Prokofieva, 2000; Beyer *et al.*, 2000; Lal, 2002; Yang *et al.*, 2015). A pesar de esto, los Tecnosoles brindan los mismos servicios ecosistémicos que un suelo natural, aunque son poco valorados en las zonas urbanas. Básicamente se concibe al suelo como soporte de construcciones o infraestructura, lo que favorece prácticas para su “sellamiento” dando origen a problemas de encharcamientos, inundaciones, pérdida de biodiversidad y déficit en la recarga de acuíferos, entre otros (Cram, *et al.*, 2008).

## 2.3 Propiedades que deben tener los suelos artificiales para permitir el crecimiento vegetal

Para obtener buenas condiciones durante la germinación, enraizamiento, y crecimiento de las plantas, los suelos artificiales deben cumplir con las siguientes funciones: suministrar suficientes nutrientes disponibles para las plantas, favorecer la unión de las partículas minerales para formar agregados, tener una estructura estable, servir como soporte, textura franca, abundante agua disponible para las plantas y condiciones adecuadas de aireación del suelo, densidad aparente baja, cercana a  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$ , mínima velocidad de degradación, estar libre de patógenos, ser de bajo costo, y resistencia a cambios físicos, químicos y ambientales (Morel *et al.*, 2015).

### 2.3.1 Nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas

Existen 13 elementos esenciales para el crecimiento de las plantas clasificados como macronutrientes y micronutrientes, dependiendo de su abundancia en las plantas (Marschner, 2012). Los macronutrientes son el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, mientras que los micronutrientes son el cloro, hierro, boro, manganeso, cinc, cobre y molibdeno (Marschner, 2012; Havlin *et al.*, 1999). A continuación, se describen las funciones y procesos más relevantes en los que actúan los nutrientes empleados en el presente estudio.

Nitrógeno (N). A pesar de que el 78% de la atmósfera terrestre está constituida por nitrógeno en forma gaseosa ( $\text{N}_2$ ), frecuentemente limita el crecimiento de las plantas. El nitrógeno es absorbido en forma de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , y constituye entre el 1 y 5% del peso seco de los tejidos vegetales. El nitrógeno proveniente de los residuos animales y vegetales, las tormentas eléctricas y la combustión, se combina con el  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ , permaneciendo en la materia orgánica del suelo. La mineralización de nitrógeno implica que el nitrógeno es descompuesto en formas disponibles para las plantas como el amonio  $\text{NH}_4^+$ , que es absorbido por las raíces de las plantas. Generalmente la absorción de  $\text{NO}_3^-$  se ve favorecida por pHs bajos. El nitrato debe reducirse a  $\text{NH}_4^+$  para llevar a cabo sus funciones como nutriente. El N es parte

integral de la clorofila necesaria para realizar la fotosíntesis. Cuando existen deficiencias en nitrógeno, el crecimiento de las plantas se ve interrumpido, manifestándose con la presencia de clorosis en las hojas (Marschner, 2012; Havlin *et al.* 1999). En la materia orgánica estable la relación C/N fluctúa entre 9 y 12. Las relaciones altas de C/N promoverán la inmovilización del nitrógeno. Si los materiales orgánicos tienen una relación C/N menor a 20, usualmente hay una liberación de N mineral. Éste será proporcionado a las plantas después que los microorganismos mueran y el nitrógeno sea liberado (Chaves *et al.*, 2007).

Fósforo (P). El fósforo en las plantas se encuentra en una proporción que va de 0.1 a 0.5%, y es absorbido en forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ . La absorción del primero es mayor en pH bajos, mientras que la del segundo a pH altos (arriba de 7.2, Havlin *et al.*, 1999). La función del fósforo en las plantas es el almacenamiento y la transferencia de energía, en donde el ATP es convertido en ADP (fosforilación). El fósforo es un componente estructural de los ácidos nucleicos, coenzimas, nucleótidos, fosfoproteínas, fosfolípidos y azúcares fosfatadas. Una gran cantidad de fósforo se encuentra en semillas y frutos, por lo que se considera esencial para su formación. Además, está asociado al aumento en el crecimiento de las raíces (Marschner, 2012).

Los síntomas de deficiencia de fósforo se evidencian por una coloración púrpura en las hojas (Marschner, 2012, Havlin *et al.* 1999). El fósforo no es tan abundante en el suelo como el nitrógeno o el potasio, la cantidad de fósforo en el suelo oscila entre 0.005 a 0.150%, del cual sólo una pequeña porción es disponible para las plantas. El fósforo orgánico representa aproximadamente el 50% del fósforo total y en muchos suelos varía entre 15 y 80%. El contenido de fósforo en la materia orgánica del suelo varía de 1% a 3% (Havlin *et al.*, 1999).

Potasio (K). El potasio es absorbido por las plantas en forma de  $\text{K}^+$ . Su concentración en los tejidos vegetales oscila entre el 0.5 al 6% de su peso seco. A diferencia de otros nutrientes no forma compuestos, por lo que su principal función está relacionada con la fuerza iónica de las soluciones. Otras funciones del potasio son: activar enzimas involucradas en procesos fisiológicos, bombear agua hacia el interior de las raíces e interviene en la formación de ATP (Marschner, 2012; Havlin *et al.*, 1999). Después del nitrógeno, el potasio es el nutriente que más absorben

las plantas. En los suelos se encuentra en un intervalo que va de 0.5% a 2.5%, aunque el contenido de potasio en el suelo es muchas veces mayor al que requieren las plantas, solamente una pequeña fracción es disponible para éstas (1 a 10% son lentamente disponibles y de 0.1% a 2% son rápidamente disponibles). La absorción de  $K^+$  decrece con la presencia de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . Los síntomas que evidencian las deficiencias en potasio varían dependiendo de la especie, usualmente hay decremento en el tamaño de las plantas y clorosis con tonos verdes en la base de las hojas (Havlin *et al.*, 1999).

### 2.3.2 Capacidad de retención de agua

La cantidad de agua que puede retener un suelo depende de factores como el volumen y la distribución del tamaño de los poros (porosidad), la cual a su vez depende de la textura, la materia orgánica, la estructura y la densidad aparente. La cantidad de agua que un suelo puede retener contra la gravedad se denomina capacidad de campo (CC), en este caso los microporos y los mesoporos estarán saturados con agua.

El agua retenida en los microporos no puede ser absorbida por la mayoría de las plantas, y se le denomina punto de marchitez permanente (PMP). La cantidad de agua que el suelo puede proporcionar a las plantas se denomina capacidad de retención de agua disponible o capacidad de campo (dCC). El agua disponible se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente del sustrato (Siebe *et al.*, 2016).

### 2.3.3 Densidad aparente

La densidad aparente de un sustrato se define como la masa de una unidad de volumen de sustrato seco. En el volumen se incluyen sólidos y poros, el nivel óptimo fluctúa alrededor de  $0.9 \text{ g cm}^{-3}$ . Los sustratos con un espacio poroso grande tienen densidades aparentes bajas, cualquier factor que afecte el espacio poroso afecta la densidad aparente. Los suelos compactados tienen poca agua disponible para las plantas, además la firmeza del suelo es alta más de los 2000 kPa, nivel límite para la penetración de las raíces. La manipulación y las perturbaciones en los suelos

urbanas ocasionadas por actividades de construcción o remodelación ocasionan generalmente compactación en los horizontes superficiales y algunas veces llegan a afectar los horizontes más profundos. Además de que la compactación reduce la penetrabilidad de las raíces forzándolas a crecer en los horizontes superficiales, también disminuye la capacidad de retener agua disponible para las plantas y afecta el drenaje al impedir el libre movimiento del agua. Adicionalmente, la compactación reduce el espacio poroso y el intercambio de gases con la atmósfera, reduciendo el flujo de oxígeno que requieren las raíces para funcionar apropiadamente, así como el exceso de dióxido de carbono que debe ser removido. (Nurul-Nasyitah Shukor *et al.*, 2015).

#### 2.3.4 Acidez y alcalinidad

El término pH significa “potentia hydrogenii” y se refiere al logaritmo negativo de la concentración de  $H^+$  en el agua. Las soluciones con un  $pH < 7$  son ácidas, aquellas con  $pH > 7$  son básicas, y con  $pH = 7$  son neutras. El agua neutra contiene  $10^{-7}$  moles/litro de  $H^+$  y la misma cantidad de  $OH^-$ . El producto de las dos concentraciones siempre será  $10^{-14}$  moles<sup>2</sup> litro<sup>-2</sup>. Cuando se añaden iones  $OH^-$ , el producto de los iones se mantiene sin cambios, pero la concentración de  $H^+$  disminuye y el pH aumenta (y viceversa). El pH en los suelos debe oscilar entre 6.5 y 7.5, que es el intervalo en el que se absorben la mayor cantidad de nutrientes esenciales (Havlin *et al.*, 1999).

El pH del suelo determina en gran medida la forma y la disponibilidad de nutrientes. Además, afecta la actividad y diversidad de las poblaciones de microorganismos edáficos de los cuales dependen muchos de estos procesos (Pär, 2004). Por otra parte, el agua en las áreas urbanas fluye por materiales sintéticos como el asfalto, concreto y mampostería, disolviendo sustancias de estas superficies y absorbiendo otras traídas por la depositación de contaminantes (Yilmaz *et al.*, 2008). Estas sustancias son acarreadas y depositadas en los suelos, ocasionando reacciones que tienden a aumentar el pH del suelo, afectando a las plantas que están adaptadas a condiciones edáficas ácidas. Debe tenerse en cuenta que un pH elevado puede ocasionar deficiencias nutrimentales y un incremento en la solubilidad de sustancias tóxicas.

### 2.3.5 Salinidad

Un suelo es considerado como salino cuando la conductividad eléctrica de su extracto de saturación (contenido de sales solubles en agua provenientes de un suelo) es mayor de  $4 \text{ mS cm}^{-1}$  (miliSiemens por centímetro); un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15 y pH menor de 8.5. Las sales acumuladas contienen aniones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ , y cationes de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Los suelos sódicos tienen una cantidad de sodio intercambiable mayor al 15%, una conductividad eléctrica menor a  $4 \text{ mS cm}^{-1}$  y un pH mayor a 8.5 (Havlin *et al.*, 1999).

### 2.4 Generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México

La Ciudad de México representa el principal centro político, económico, científico y cultural del país, otorgando a la ciudad un ritmo de vida acelerado que se ve reflejado directamente en el consumo y aprovechamiento de recursos naturales. Además de repercutir directamente en la generación de una gran cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) (PGIRS, 2016). Éstos se definen como residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en actividades domésticas, de los productos consumidos y de sus envases, embalajes o empaques (LGEEPA, 2015). De acuerdo con el inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México (SEDEMA, 2018), en el año 2018, la generación de residuos fue de 13,073 toneladas al día. La principal fuente generadora de residuos sólidos fue la domiciliaria con el 50% (6,275 ton al día), seguida de los comercios con el 26% (3,348 ton al día) y en menor porcentaje otros servicios como los controlados y la Central de Abastos. El 60% de los residuos domiciliarios son inorgánicos y el resto orgánicos (2615 ton al día). Los desechos están divididos de la siguiente manera: 31% son residuos alimenticios, 14.2% papel y cartón, 9.8% desechos de jardinería, 6.6% vidrio, 5.8% plástico, 3.1% metales, 1.2% textiles y 27.7% son otros desechos sin clasificar (Mora Reyes, 2004).

## 2.5 Residuos urbanos (orgánicos e inorgánicos) con potencial de ser empleados en la elaboración de Tecnosoles

### 2.5.1 Residuos relacionados con la industria de la construcción

En la Ciudad de México, se producen 7000 toneladas diarias de residuos relacionados con la industria de la construcción, como lo es madera, paneles de yeso o de cemento, residuos de albañilería, metales, vidrio, plásticos, asfalto, concretos, ladrillos, bloques, materiales de excavación y cerámicos; todas éstas tienen potencial de reuso o reciclaje. La norma ambiental NADF-007-RNAT-2013 establece la clasificación de residuos de construcción y demolición y especificaciones para fomentar su aprovechamiento, de tal forma que se minimice su disposición inadecuada en la Ciudad de México. Sin embargo, la Ciudad no cuenta con suficientes sitios autorizados para depositar estos residuos, solo hay uno en la alcaldía Xochimilco y una empresa privada “Concretos Reciclados” en la alcaldía Iztapalapa, en donde se procesa a penas el 3% de estos desechos. En esta empresa se trituran y muelen los residuos ya seleccionados y se producen materiales como gravas y arenas que se emplean en la industria de la construcción. Sin embargo, se siguen depositando de manera clandestina el resto de los residuos que no se reciclan en lugares prohibidos como carreteras, barrancas, suelos de conservación, y áreas naturales protegidas, generando problemas ambientales y de seguridad para los ciudadanos. Los residuos de construcción pueden interrumpir el paso de agua en una barranca y provocar inundaciones, escurrimientos, afectaciones a las áreas naturales protegidas, o simplemente dañar la imagen urbana.

### 2.5.2 Residuos orgánicos (compostas)

Los posibles impactos ambientales y económicos adversos de los agroquímicos en la producción de plantas ornamentales han estimulado el interés en una mayor utilización de enmiendas orgánicas como la composta y lombricomposta para producir y mantener plantas para su uso en invernaderos, hogares y jardines comerciales (Arancon, 2008). Las tecnologías de compostaje pueden constituir una alternativa viable para el manejo de la fracción orgánica de residuos orgánicos, debido a su simplicidad e implementación rápida y fácil. Además, esta tecnología

implica menores costos en comparación con otras opciones, que requieren mayores recursos económicos para su puesta en marcha y mantenimiento. En este sentido, el análisis de costo-beneficio de los vertederos y el compostaje, indica que el compostaje es una alternativa viable para el reciclaje de residuos orgánicos sólidos, debido a sus bajos costos ambientales y sociales (PNUMA, 2011). El compostaje y el lombricompostaje son consideradas tecnologías biológicas donde es posible ejercer control sobre los procesos de biodegradación de la materia orgánica. Se basan principalmente en la maduración/estabilización de la materia orgánica, evitando efectos fitotóxicos y daños ambientales (Sztern y Pravia, 1999).

### 2.5.3 Compostas

El compostaje es un proceso aeróbico de fermentación en fase sólida, que se basa en altas temperaturas y bacterias termofílicas y mesofílicas, los diferentes materiales orgánicos son transformados en sustancias más estables que son precursores de sustancias húmicas (Zapata, 2009; Füleky y Benedek, 2010). La composta puede elaborarse a partir de diversos residuos como: restos de cosechas y cultivos que incluyen tallos, fibras, cutículas, cáscaras, aserrín, bagazos, rastrojos, restos de podas o frutas. También puede ser de origen animal como los excrementos sólidos y semisólidos (estiércoles) y líquidos (purines), cadáveres, sobrantes de suero y leche. El composteo requiere de una selección previa de los residuos, debe eliminarse todo material que no sea de origen orgánico y de ser posible todos los organismos patógenos. El compostaje es un proceso biooxidativo controlado en el que intervienen numerosos y variados microorganismos (bacterias, actinomicetes, hongos, algas, protozoos y cianofíceas) que transforman los residuos frescos en un material más humificado y estabilizado (Adami et al., 1997; Mendoza-Hernández et al., 2014).

Durante el proceso de compostaje se pueden distinguir las siguientes etapas: Etapa de latencia: es la etapa inicial, considerada de la formación de la pila hasta que se constatan incrementos de temperatura respecto a la temperatura del material inicial. Esta etapa puede durar entre 24 y 72 horas. Etapa mesotérmica (10-40°C): en esta etapa, se destacan las fermentaciones facultativas de la microfloramesófila, en concomitancia con oxidaciones aeróbicas (respiración aerobia). La falta de

ventilación produce un incremento de calor que favorece el desarrollo de microflora termófila que se encuentra latente en los residuos. Etapa termogénica (40-75°C): la microfloramesófila es sustituida por la termófila. En esta etapa se eliminan todos los mesófilos patógenos, esporas, hongos, semillas y elementos biológicos indeseables. Si la compactación y ventilación son adecuadas se producen evidentes emanaciones de vapor de agua. El CO<sub>2</sub> se produce en volúmenes importantes, este gas es importante en el control de larvas de insectos. Conforme el ambiente se hace totalmente anaerobio, mueren los grupos termófilos. Etapa mesófila: con el agotamiento de los nutrimentos y la desaparición de los termófilos, comienza el descenso de la temperatura, cuando alcanza temperaturas iguales o menores a 40°C se desarrollan nuevamente los microorganismos mesófilos, que utilizan como nutrimentos los materiales más resistentes a la biodegradación, como la celulosa y lignina. Etapa de maduración: La temperatura descenderá paulatinamente hasta alcanzar valores cercanos a la temperatura ambiente. El material se vuelve estable biológicamente y se da por terminado el compostaje (Zhang *et al.*, 2013).

El compostaje de residuos orgánicos reduce la cantidad de materia orgánica (MO), con la consiguiente reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, con este procedimiento se obtiene un producto de valor agregado que puede usarse de manera segura como enmienda del suelo (Jara-Samaniego *et al.*, 2016). Las compostas pueden aumentar la fertilidad del suelo, la actividad microbiana y el crecimiento del cultivo (Alvarenga *et al.*, 2016; Gong, 2018).

Al igual que el compostaje, el lombricompostaje es un proceso de biooxidación y estabilización de la materia orgánica, bajo condiciones aeróbicas y mesofílicas, mediado por la acción combinada de microorganismos y lombrices, a través del cual se obtiene un producto conocido como lombricomposta. Esta práctica de biotransformación aprovecha el comportamiento de las lombrices que aceleran la descomposición y degradación de la materia orgánica, de un modo directo (alimentación detritívora y desplazamiento a través de las galerías) o indirecto. La actividad de las lombrices aumenta el contenido de nutrimentos de fácil asimilación por las plantas y son responsables directa o indirectamente de sustancias que actúan como reguladores de crecimiento. Las especies de lombriz frecuentemente utilizadas para la lombricultura son *Eisenia foetida*, *Lumbricus rubellus*, *Eisenia andrei*, *Eisenia hortensis* y *Lumbricus cataneus* (Hait y Tare, 2011; Pathma, J. y

Sakthivel, N. 2012; Gong, 2018). Las lombricompostas son materiales similares a turba, finamente divididos con alta porosidad, buena aireación y drenaje, capacidad de retención de agua y una actividad microbiana muy alta, que los hacen excelentes como enmiendas o acondicionadores del suelo y como medios de crecimiento vegetal (Edwards *et al.*, 1988; Edwards, 1998; Edwards *et al.*, 2004).

Frecuentemente los residuos que formarán parte de los suelos artificiales deben ser tratados previamente. Algunos de los tratamientos que se realizan son: pasteurización de las compostas para inhibir la viabilidad de semillas presentes; deshidratación y limpieza de los lodos de depuradora mediante esterilización térmica para asegurar la ausencia de microorganismos originales, ya que el objetivo es que se desarrollen los propios del suelo al que va dirigido; desmetanización por termohidrólisis de los lodos procedentes de digestiones anaerobias, así como elección, trituración y clasificación de los residuos.

#### 2.5.4 Residuos orgánicos (Biocarbón)

Por otro lado, se ha demostrado que el biocarbón puede ser utilizado como una enmienda orgánica prometedora (Lehmann *et al.*, 2006). El biocarbón es un material estable, rico en carbono producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C) y que es destinado a uso agrícola, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado (Escalante, *et al.*, 2016). La materia prima usada para la elaboración de biocarbón y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirólisis, definen las características estructurales y químicas, dando origen a materiales muy heterogéneos (Schmidt y Noack, 2000; Antal y Grønli, Lehmann, 2007; 2003; Brick, 2010).

El biocarbón puede mejorar las funciones del suelo, así como intervenir en los procesos que en él se desarrollan (Verheijen *et al.*, 2009). Según Amonette (2009), la aplicación de biocarbón aumenta la capacidad de retención de nutrientes en el suelo, con la consecuente reducción de la necesidad de aplicar altas dosis de fertilizantes (Glaser, 2001), lo que se traduce en un aumento de la eficiencia de uso del fertilizante (Gaunt y Cowie, 2009; Laird *et al.*, 2009; Eldridge *et al.*, 2010;

Knowles *et al.*, 2011). También actúa como un agente aglutinante en la formación de agregados del suelo (Brodowski *et al.*, 2006) y aumenta la conductividad eléctrica, el P disponible y la actividad microbiana en el suelo (Lehmann *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2015; Ok *et al.*, 2015). Puede mejorar la capacidad de retención de agua y la tolerancia a la sequía (Laird *et al.*, 2010; Kammann *et al.*, 2011), a la vez que puede aumentar la permeabilidad al agua y reducir la escorrentía y los costos de riego (De Gryze *et al.*, 2010). El biocarbón también puede incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y, por lo tanto, la retención de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , lo que probablemente se atribuye a su elevada superficie específica, alta carga superficial negativa y elevada densidad de carga (Escalante *et al.*, 2016). Sin embargo, estos efectos varían según la tasa de aplicación de biocarbón, el tipo de materia prima, la condición de pirólisis y el tipo de suelo (Van Zwieten *et al.*, 2010).

El biocarbón contribuye a inhibir el cambio climático (Granatstein *et al.*, 2009), porque disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero (óxido nitroso, metano y dióxido de carbono) (Gathorne *et al.*, 2009), también favorece el secuestro de carbono (Goldberg, 1985, Verheijen *et al.*, 2009) debido a su naturaleza altamente aromática que lo hace menos disponible para la degradación microbiana (Sohi *et al.*, 2010). El biocarbón ha recibido una atención creciente por sus beneficios agronómicos (Sohi *et al.*, 2010) y su influencia en las transformaciones de carbono y nitrógeno en los suelos (Clough y Condron, 2010; Spokas *et al.*, 2012). El biocarbón actúa como una enmienda del suelo que mejora el crecimiento de las plantas, debido a que retiene nutrientes y mejora propiedades físicas y biológicas del suelo (Lehmann y Joseph, 2015; Lehmann *et al.*, 2010), lo cual ofrece una herramienta sostenible para el manejo de la agricultura (De la Rosa *et al.*, 2014) y la remediación del suelo (Lehmann y Joseph, 2015).

## 2.6 Rasgos funcionales en plantas como indicadores de desempeño

Los rasgos funcionales son atributos morfo-fisio-fenológicos, bioquímicos y regenerativos medibles a nivel de un individuo, que influyen en su crecimiento, reproducción y supervivencia (Vandewalle, *et al.*, 2010). Estos tienen un papel muy importante en la ecología vegetal, ya que nos ofrecen pistas y conocimientos sobre

cómo y por qué una planta puede comportarse como lo hace, dónde crece y dónde no, cómo interactúa con otras plantas y cómo influye en el entorno abiótico y biótico que la rodea (Reich, 2014). Existe una amplia variedad de rasgos funcionales que reflejan la forma en que las plantas responden a las condiciones ambientales (y por lo tanto al suelo) y que proveen información de las diferentes estrategias ecológicas de las plantas (Lavorel y Garnier, 2002; Cornelissen, *et al.*, 2003; Violle, *et al.*, 2007).

Las estrategias ecológicas dependen en gran medida de la disponibilidad de los recursos en el ambiente (Díaz, *et al.*, 2004; Wright, *et al.*, 2004; Freschet, *et al.*, 2010). Se ha propuesto un único espectro de economía vegetal “rápido-lento” que es impulsado por la integración de rasgos de la planta que explica estrategias ecológicas para adquirir, procesar y retener múltiples recursos limitantes (Freschet *et al.*, 2010; Pérez-Ramos *et al.*, 2012; Reich, 2014). En un extremo de este gradiente, encontramos especies de crecimiento lento y con un uso más conservativo de los recursos, en donde la inversión en tejido costoso produce órganos de larga vida que tienen tasas metabólicas más lentas, lo que les permite ser más competitivas en ambientes pobres y secos. En el otro extremo, se encuentran especies con estrategia adquisitiva con una inversión en tejido barato que promueve un crecimiento rápido y elevada tasa de procesamiento de recursos, lo que les permite ser dominantes en zonas más húmedas y fértiles (Reich, *et al.*, 1999; Domínguez, *et al.*, 2012). Este “espectro económico” como patrón general, se ha planteado a nivel de las hojas (Wright y Westoby, 2002; Wright, *et al.*, 2004; Fyllas, *et al.*, 2009), tallo (Chave, *et al.*, 2006; Baraloto, *et al.*, 2010) y raíces (Ho, *et al.*, 2005; Roumet, *et al.*, 2016). Algunos trabajos han propuesto que estos espectros están coordinados entre diferentes órganos (Reich, *et al.*, 1998; Freschet, *et al.*, 2010).

Las condiciones edáficas son un factor que afectan fuertemente el desarrollo de las plantas de cultivo (Vázquez, 2019) por ende, la expresión de los rasgos funcionales. Las características del suelo que determinan su calidad, como las concentraciones de nutrientes, la estructura, la aireación, la salinidad, el pH, el agua disponible, las comunidades de macroinvertebrados entre otras (Comas, *et al.*, 2013), afectan la expresión de características tales como el porcentaje y duración de la germinación de las semillas, la penetrabilidad de las raíces y su longitud, la altura de la planta, el tamaño de las hojas, la cantidad y peso de los frutos, entre otras (García, *et al.*,

2012). A su vez, estas características vegetales influyen en la productividad del sistema y en los ciclos biogeoquímicos (Vandewalle, *et al.*, 2010).

Aunque la información proporcionada por rasgos funcionales es basta, los estudios realizados se han enfocado en su mayoría al ámbito silvestre, por lo que a nivel de cultivos se tiene muchas incógnitas. Es por ello que en este trabajo se plantea la utilización de rasgos funcionales, los cuales pueden vincularse y darnos pistas de la calidad de los suelos. Esto debido a que en diversos estudios realizados en agroecosistemas, la teoría y las observaciones sugieren que la descripción de la diversidad agrícola basada en la variación del rasgo funcional de la planta, ofrecen información mecanicista sobre los procesos agroecológicos, que incluyen (pero no se limitan a) las respuestas de las plantas al cambio ambiental, los determinantes de los ciclos de nutrimentos del suelo y la diversidad (Garnier y Navas, 2012; Martin e Isaac, 2015; Wood *et al.*, 2015).

## 2.7 Importancia del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México

Los frijoles (*Phaseolus* sp.) pertenecen a la familia de las leguminosas (Fabaceae), junto con los chícharos, habas, soya, mezquites, huizaches, y alrededor de 19,400 especies. En el mundo se conocen alrededor de 150 especies de frijoles, de las cuales 50 se encuentran en México (CONABIO, 2012).

El frijol común tiene una gran tradición que se remonta a tiempos prehispánicos, y presenta amplia diversidad de formas silvestres y cultivadas. Son originarios de América, donde se domesticaron hace más de 7 000 años. Durante ese proceso, el frijol se convirtió en uno de los tres cultivos básicos de la milpa, pues además de ofrecer vainas tiernas para consumo inmediato (los ejotes) o semillas secas (para su almacenamiento y consumo posterior) ayuda a fijar en el suelo el nitrógeno que el maíz requiere para crecer (Muñoz, 2010).

Su presencia a lo largo de la historia de México, lo ha convertido no sólo en un alimento tradicional, sino también en un elemento de identificación cultural, junto con el maíz es la base de la alimentación de este país. Es la principal fuente de proteína vegetal de la población mexicana: además, es una fuente rica en carbohidratos y aceptable en vitaminas y minerales. El frijol se consume en México

en una gran variedad de formas, prácticamente cada localidad tiene preferencias que varían en color, tamaño y requerimientos ecológicos (Castellanos *et al.*, 1997; Vidal-Barahona *et al.*, 2006). Esta leguminosa representa un cultivo clave en la dieta nacional, pues el consumo anual per cápita es de 9.9 kg; la producción nacional cubre casi la totalidad de los requerimientos de consumo de los mexicanos. Nuestro país es el cuarto productor, pues genera 5.5% de la producción mundial. No obstante, en el periodo 2003-2016 se observó una reducción acumulada en la superficie sembrada de 20% y de la producción en 23% (SAGARPA, 2017).

Las leguminosas, como los frijoles y las lentejas, tienen la capacidad de asociarse con bacterias del género *Rhizobium*, en una simbiosis donde, por un lado, la leguminosa proporciona a la bacteria hidratos de carbono que le dificultaría obtener independientemente, por otro, utiliza el nitrógeno atmosférico fijado por la bacteria en forma de amoníaco que se difunde a su alrededor y que es aprovechado por el propio frijol y plantas aledañas, pues estas bacterias invaden los nódulos de las raíces y enriquecen el suelo (López, 1993; Hames y Hooper, 2005).

La variedad de frijol empleada en el experimento, se adquirió de productores locales para que estuviera adaptado a las condiciones climáticas de la Ciudad de México, la semilla era pequeña y de color negro que originalmente provenía de Zacatecas.

### **III. Objetivos**

#### 3.1 Objetivo general

Evaluar la calidad de siete Tecnosoles elaborados a partir de residuos urbanos orgánicos e inorgánicos, con base en sus propiedades físicas y químicas, y de los rasgos funcionales de crecimiento y productividad de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol).

#### 3.2 Objetivos particulares

Caracterizar las variables físicas y químicas de siete Tecnosoles elaborados a partir de residuos urbanos.

Analizar el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), en siete Tecnosoles elaborados a partir de residuos urbanos y relacionarlos con variables edáficas.

Determinar el TecnoSol más adecuado para el cultivo de frijol, con base en las propiedades edáficas y el desempeño de las plantas de frijol.

Identificar rasgos funcionales estratégicos que definan el manejo de recursos de tipo conservativo o adquisitivo y analizar si existe un síndrome paralelo entre rasgos aéreos y subterráneos.

Relacionar las variables físicas y químicas de los siete Tecnosoles con rasgos funcionales del frijol.

#### **IV. Hipótesis**

La materia orgánica humificada contenida en las compostas aplicadas a los Tecnosoles, actuará como enmienda, mejorando propiedades físicas y químicas de los Tecnosoles, disminuirá la densidad aparente y el pH, otras se incrementarán como la porosidad (directamente relacionada con la capacidad de retención de agua disponible y la capacidad de aireación), la conductividad eléctrica y la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, particularmente nitrógeno. Esto repercutirá en un mejor crecimiento y productividad de las plantas de frijol.

El concreto contenido en los residuos de excavación y construcción está compuesto principalmente por hidróxidos de Ca y Si, por lo que tienen un pH básico. La alcalinidad afecta el crecimiento de las plantas, no obstante, se espera que la mezcla de estos residuos con la composta, que tiene pH neutro, contribuya a disminuir el pH del Tecnosoles a niveles que permitan el crecimiento de las plantas de frijol.

El biocarbón posee características físicas deseables como alta porosidad, densidad aparente baja, buena capacidad de retención de agua y adsorción y liberación lenta de nutrimentos, que contribuyen a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los Tecnosoles, por lo que esperamos un mayor crecimiento y productividad del cultivo de frijol.

Se espera que las enmiendas composta-biocarbón y lombricomposta mejoren las propiedades físicas y químicas de los Tecnosoles con residuos de excavación y construcción, de tal forma que sean tan adecuados para el cultivo de frijol como los Tecnosoles que carecen de estos residuos inorgánicos.

Los tratamientos mezclados con composta-biocarbón poseen dos enmiendas importantes, por lo que se esperaría que sus propiedades edáficas tuvieran mejores cualidades que los tratamientos mezclados con lombricomposta.

Los rasgos funcionales se expresarán en respuesta a las condiciones físicas y químicas de los Tecnosoles, se espera que en suelos de buena calidad, exista una tendencia hacia estrategias de tipo adquisitivas con altos valores de área foliar específica y baja inversión estructural. Mientras que, en los Tecnosoles con características edáficas desfavorables, se espera una tendencia hacia estrategias de tipo conservativas con valores bajos de área foliar específica y una alta inversión de carbono en sus estructuras.

## **V. Métodos**

### 5.1 Diseño experimental

El presente estudio se realizó en un predio de la planta de composta de Ciudad Universitaria, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El montaje del experimento se realizó en febrero de 2018 y tuvo una duración de 6 meses. Se implementaron 7 tratamientos con 4 repeticiones que se distribuyeron de acuerdo con el diseño bloques al azar (Sokal y Rohlf, 2012), esto con la finalidad de disminuir el efecto del gradiente lumínico que generaba el corte de roca presente en el predio del experimento que anteriormente había sido una cantera. El acomodo de los bloques se representa en la Figura 1.

Para que las plantas de la especie objeto de estudio (*Phaseolus vulgaris* L.) pudieran desarrollarse adecuadamente sin que tuvieran problemas de espacio ni competencia, se construyeron módulos de madera y lona de 1.45 m de largo por 1.40 m de ancho y una profundidad de 40 cm. Esta profundidad es adecuada para

que la raíz del frijol pueda desarrollarse óptimamente. Con estas dimensiones, los contenedores tuvieron un volumen de 0.81 m<sup>3</sup>. Como medida preventiva, se colocó una estructura con malla de gallinero alrededor del terreno, con la finalidad de proteger a las plantas de la herbívora de aves y mamíferos.

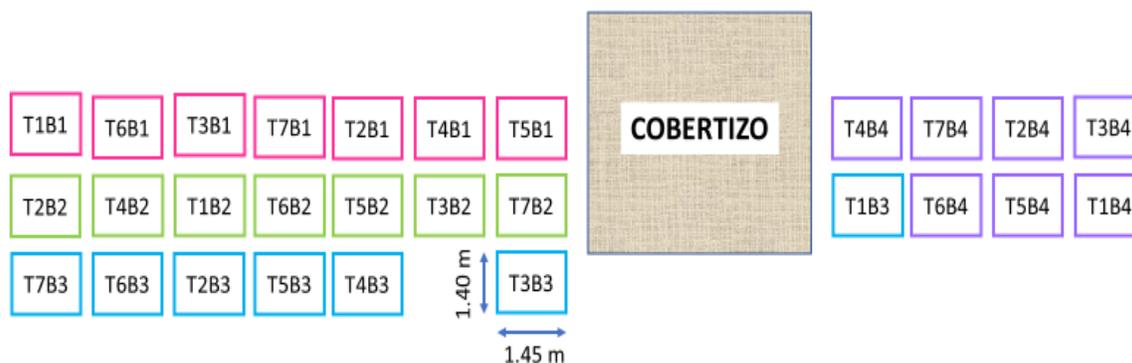


Figura 1. Croquis del diseño experimental conformado por 4 bloques y 7 tratamientos.

Los Tecnosoles estuvieron conformados por una fracción orgánica y otra inorgánica. Los materiales que conformaron la fracción orgánica fueron: composta de residuos domésticos provenientes de la planta del gobierno de la Ciudad de México, localizada en el Bordo de Xochiaca; lombricomposta adquirida con proveedores particulares; madera triturada proveniente de la planta de composta de CU, y biocarbón proveniente del Centro de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa de la UNAM.

La fracción inorgánica estuvo conformada por residuos de excavación (compuesto de una mezcla de concreto, cascajo y suelo natural muy heterogéneo) y residuos de construcción (compuesto de cascajo triturado, con partículas de 2 a 5 mm aproximadamente) que se adquirieron en la empresa “Concretos Reciclados” localizada en la Alcaldía Iztapalapa. Dos tratamientos estuvieron conformados por residuos de excavación (T1 y T2, 30% en volumen), el T1 se mezcló con 25% de composta, 20% de biocarbón y 25% trozos de madera, mientras que al T2 se le adicionó 45% de lombricomposta y 25% trozos de madera. El tratamiento tres (T3) estuvo conformado por 30% de residuos de excavación, 45% de biocarbón y 25% trozos de madera. Se aplicó un fertilizante NPK (17-17-17, con micronutrientes),

a razón de 140 kg por hectárea, aplicando 6 pequeñas dosis a lo largo del cultivo (0.4 g por planta). Los tratamientos cuatro y cinco (T4 y T5) estuvieron conformados por 30% de residuos de construcción y 25% trozos de madera. El T4 se mezcló con 25% de composta y 20% de biocarbón, mientras que al T5 se le adicionó 45% de lombricomposta. El tratamiento seis (T6) estuvo conformado de 25% composta, 20% biocarbón y 55% de trozos de madera, mientras que el tratamiento siete (T7) estuvo conformado por 45% de lombricomposta y 55% trozos de madera. Las proporciones de los materiales que se destinaron a cada uno de los tratamientos se puede observar en la Figura 2.

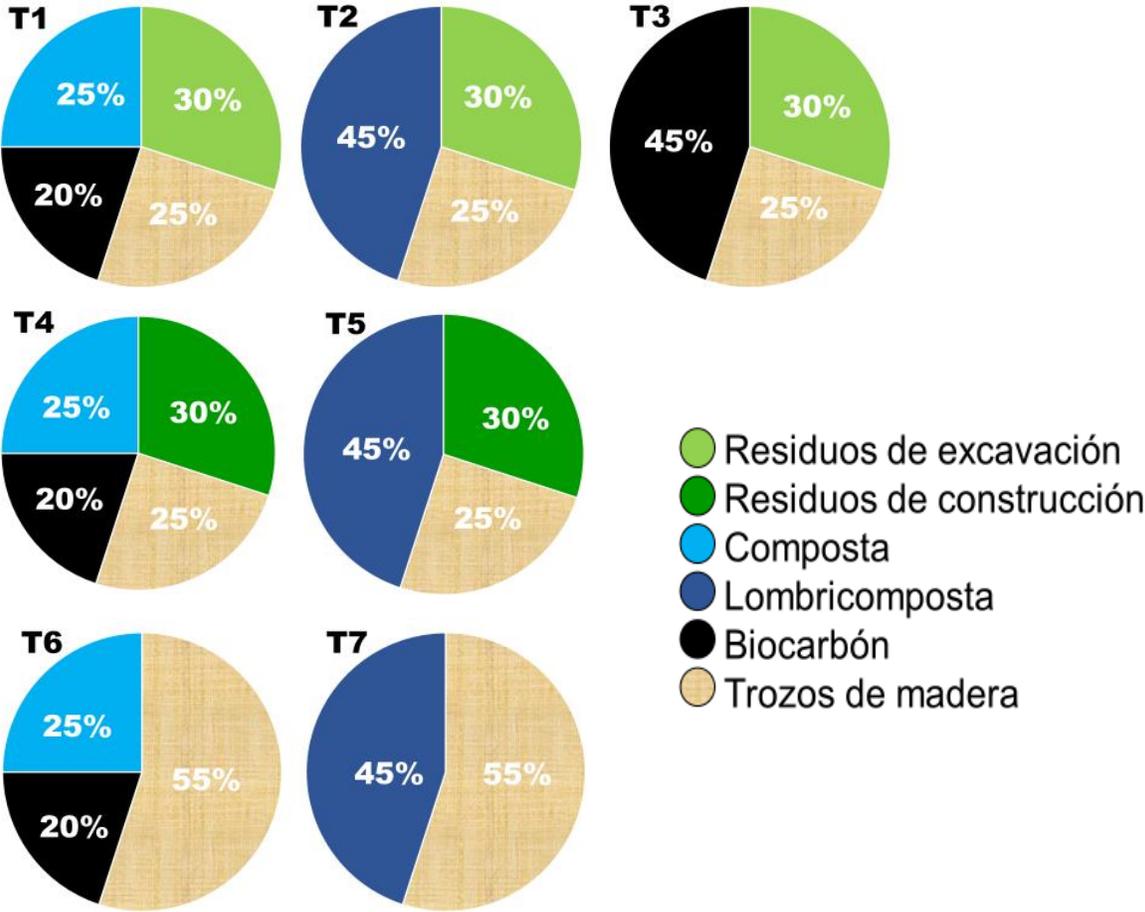


Figura 2. Composición (%) de los diferentes residuos empleados en los Tecnosoles. Únicamente al tratamiento 3 se le aplicó fertilizante.

Nos interesa conservar el germoplasma de la región, de modo que las semillas de frijol se adquirieron con productores locales de la Ciudad de México, aclimatadas a las condiciones ambientales del Altiplano Mexicano. La siembra de las semillas fue realizada el 16 de marzo de 2018, se sembraron 24 semillas por módulo y de las semillas que lograron germinar, se seleccionaron un total de 12 plantas por cada módulo experimental que, al multiplicarse por siete tratamientos y cuatro réplicas por tratamiento, dio un total de 336 individuos de frijol en el experimento. Las plantas de frijol fueron regadas cada 4 días a su capacidad de campo, con excepción de los días lluviosos.

## 5.2 Análisis físicos y químicos del suelo

Antes de ser montado el experimento, se realizó un análisis de concentración de metales pesados en los residuos empleados para la elaboración de los Tecnosoles (Anexo 1), con el objetivo de saber si estos materiales cumplían con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana 147-SEMARNAT/SSA1-2004: criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados. En este trabajo fueron medidos el cadmio, cobalto, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc.

Una vez montado el experimento, se recolectaron muestras de cada Tecnosol para llevar a cabo análisis físicos y químicos con el objetivo de determinar la calidad del suelo. Adicionalmente se recolectaron 5 cilindros de 100 cm<sup>3</sup> por cada tratamiento para determinar la densidad aparente. Las muestras de cada tratamiento fueron etiquetadas y llevadas a laboratorio para su posterior análisis. Las muestras fueron secadas al aire evitando colocarlas a la luz del sol directa (Siebe, *et al.*, 2016). Posteriormente, las muestras fueron molidas y utilizadas para la mayor parte de los análisis de laboratorio. Las propiedades químicas analizadas fueron: carbono orgánico total, nitrógeno total, fósforo disponible (método Olsen), bases intercambiables, pH, y conductividad eléctrica. En el caso de las propiedades físicas del suelo, se realizaron pruebas de densidad aparente (DA) y densidad real (DR). *In situ* se instaló un equipo TDR (Time domain reflectometry) para estimar la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) y el porcentaje de porosidad total (PT). En los residuos urbanos se analizaron los nutrimentos totales en el

Laboratorio de Difracción de Rayos X, el resto de los análisis se realizaron en el laboratorio de Edafología experimental, ambos del Instituto de Geología, UNAM.

### 5.2.1 Densidad Aparente (DA)

La densidad aparente se emplea para calcular el volumen de poros en el suelo y el contenido de compuestos del suelo con base de un volumen definido del mismo (Siebe, *et al.*, 2016).

Los cilindros de 100 cm<sup>3</sup> fueron colocadas en cajas Petri taradas (peso caja Petri vacía = X) y secadas en una estufa a 105°C por 24 horas. Posteriormente, las muestras se colocaron en un desecador para su enfriamiento y fueron pesadas en una balanza analítica con una precisión de 0.001g (peso Y) (Schlichting, 1995).

Para realizar el cálculo de la densidad aparente, se restaron los pesos de las cajas Petri (Peso X), del peso después de secar las muestras (Peso Y), para obtener el peso de las muestras secadas a 105°C (Peso Z). La densidad es el cociente entre el peso Z y el volumen del cilindro con el cual se tomaron las muestras, como se muestra a continuación:

$$DA (gcm^{-3}) = \frac{(Peso Y (g) - Peso X (g))}{volumen del cilindro(cm^3)}$$

### 5.2.2 Densidad Real (DR)

La densidad real es la densidad media de las partículas del suelo. Se emplea para determinar la velocidad de sedimentación de las partículas en agua o gases (por ejemplo, en la determinación de textura) y para calcular la porosidad de un suelo (Thompson *et al.*, 2002). La densidad real se obtuvo con ayuda de un picnómetro (método volumétrico), el cual fue pesado vacío, seco y con tapa (Pv). Posteriormente se le agregaron 5 g de suelo previamente tamizado y fue pesado nuevamente (Ps). Al picnómetro se le agregó una tercera parte de agua destilada, hervida y fría, el cual cubrió todo el suelo con movimientos suaves para desalojar el aire.

Se pesó el picnómetro con suelo y agua ( $P_{sa}$ ) y posteriormente fue vaciado y secado para ser pesado nuevamente con agua destilada hervida y fría ( $P_a$ ). Se midió la temperatura del agua para poder determinar la densidad del agua ( $\rho_a$ ) (Warren, 1975) como se muestra a continuación:

$$DR = \rho_a * \frac{P_s - P_v}{(P_s - P_v) - (P_{sa} - P_a)}$$

### 5.2.3 pH y conductividad eléctrica (CE)

El valor del pH permite hacer inferencias relacionadas con la disponibilidad relativa de nutrientes y también controla importantes procesos pedogenéticos. Un intervalo del pH óptimo puede asegurar el máximo nivel de solubilidad de la mayoría de los nutrientes, lo que resulta de gran importancia en los agroecosistemas (Barbaro, *et al.*, 2014). El procedimiento consistió en pesar 10 g de cada muestra ya tamizada, posteriormente la muestra se colocó en tubos de Nalgen junto con 25 mL de agua destilada, agitando durante 18 horas para homogeneizar la mezcla (Reeuwijk, 2002). El potencial de hidrógeno se midió utilizando un potenciómetro, para ello se introdujo el electrodo en la solución sin tocar la parte sólida y se procedió a realizar la lectura hasta que esta se mantuvo estable. Las mismas soluciones preparadas para la medición del pH, se emplearon para medir la conductividad eléctrica. Ésta se midió por medio de un conductímetro, el electrodo del equipo se sumergió en la solución sin tener contacto con la parte sólida y se tomó la lectura (Motsara y Roy, 2008).

### 5.2.4 Nutrientes (C, N, P, K, Ca y Mg)

Para la cuantificación de los macronutrientes (C, N, P, K, Ca, y Mg), se colectaron muestras de los 7 tratamientos propuestos. El C orgánico y el nitrógeno total se obtuvieron con un autoanizador de CNHS (Perkin Elmer 2400). La cantidad de materia orgánica se obtuvo al multiplicar el porcentaje de C orgánico total por 1.724, considerando que el 58% de la masa de la materia orgánica del suelo, está compuesta por carbono. En cuanto al fósforo disponible fue extraído con 1 N  $\text{NH}_4\text{F}$

en 0.5 N HCl (método Bray-Kurtz) y determinado colorimétricamente como un complejo de molibdeno de amonio, utilizando ácido ascórbico como agente reductor (van Reeuwijk, 1992).

Las bases intercambiables fueron extraídas con acetato de amonio 1 N a pH 7, posteriormente el Ca y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer-PinAAcle-900 H), mientras que el K fue analizado con un flamómetro (Corning) de acuerdo con ISRIC, 2002. *Procedures for Soil Analysis* (van Reeuwijk, 1992). En cuanto a los datos de concentración ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), estos fueron transformados a unidades de masa por volumen, multiplicando la concentración por la densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) y el espesor del suelo artificial (3.5 dm), de esta forma se calculó la cantidad de nutrientes en  $\text{cmol}_c \text{ m}^{-2}$  (Siebe, *et al.*, 2016).

Con base en el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo (Siebe *et al.*, 2016), se llevó a cabo la evaluación de la calidad de los siete Tecnosoles. Esta evaluación se compaginó con los resultados de los análisis del crecimiento y la productividad para determinar el Tecnosol más propicio para el cultivo de frijol.

#### 5.2.5 Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)

La cantidad total de agua disponible en el suelo para las plantas es la diferencia entre las láminas de agua almacenadas al límite máximo de retención o almacenamiento conocido como “Capacidad de Campo” (Cc) y el límite mínimo de almacenamiento, denominado como “Punto de Marchitez Permanente” (PMP), ambas consideradas hasta la profundidad de interés para las plantas o profundidad radical efectiva (Zr) (Gardner, 1988; Hillel, 1998; Reichardt y Timm, 2004; U.S. Department of Agriculture, 2005; Allen *et al.*, 2006). Estas mediciones se obtuvieron a través de reflectometría en el dominio del tiempo, conocido como TDR por sus siglas en inglés (the Time Domain Reflectometry).

### 5.3 Crecimiento de frijol

El crecimiento es un rasgo de medición directa en campo, esta se realizó durante las dos primeras semanas de los meses de abril, mayo y junio de 2018. Se realizaron 4 mediciones de altura, cobertura y diámetro después de la siembra: la primera medición se hizo a los 30 días, la segunda a los 45 días, la tercera a los 60 días y la última medición a los 80 días. Para obtener la altura de los 151 individuos distribuidos en los 7 tratamientos, se utilizó una cinta métrica metálica, con ella fue medida la distancia desde la parte expuesta en la superficie del suelo, hasta la yema apical, descontando las ramas excepcionales o estructuras reproductivas (Cornelissen *et al.*, 2003).

En el caso de la medición de la cobertura de la planta, al tener ésta un crecimiento heterogéneo, se decidió tomar dos mediciones de diámetro perpendiculares entre sí a los 80 días desde la siembra, las cuales se utilizaron en la fórmula de una elipse:

$$Cobertura = \left(\frac{D1}{2}\right)\left(\frac{D2}{2}\right)(\pi)$$

Donde:

D1: diámetro 1

D2: diámetro 2

### 5.4 Productividad

La biomasa corresponde a la cantidad de materia orgánica contenida en la planta. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y la productividad de las plantaciones y del propio sistema (Fonseca, *et al.*, 2009).

Para medir la productividad de los Tecnosoles, se realizó la cosecha de las plantas de frijol en mayo de 2018, cuando las plantas estaban en la etapa de antesis (CIAT, 1986). Las variables registradas como productividad fueron: la suma de biomasa de hojas, tallos y raíces (en suma, conformaron la biomasa total). Se analizaron 8 plantas por cada tratamiento (2 por cada bloque) haciendo un total 56 plantas.

En este caso las variables de productividad que se registraron fueron biomasa de vainas con semillas, biomasa de semillas, así como el número de semillas por

planta. La biomasa se obtuvo colocando por separado vainas y semillas en una estufa a 60°C hasta obtener su peso constante. Se analizaron 8 plantas por cada tratamiento (2 por cada bloque) haciendo un total de 56 plantas.

#### 5.4.1 Biomasa de vainas y semillas, y número de vainas por planta

Las vainas del frijol alcanzaron su madurez en julio del 2018, momento en el que se colectaron los frutos de 376 individuos distribuidos en los 7 diferentes tratamientos (por lo menos 53 individuos de cada tratamiento), los cuales fueron almacenados en bolsas de papel debidamente etiquetadas y llevadas al laboratorio de Edafología ambiental, para su posterior procesamiento. Se trató cada una de las plantas y se separaron las semillas de las vainas, contabilizando el número de vainas por planta. También se obtuvo el peso seco de vainas y semillas colocándolas en una estufa a 60°C hasta alcanzar un peso constante.

Para la productividad de la planta es importante tomar en cuenta la biomasa seca de la semilla, ya que es un rasgo que influencia las estrategias de regeneración y dispersión, así como las tasas de sobrevivencia de las plantas (Leishman *et al.*, 2000).

#### 5.5 Medición de rasgos funcionales de las plantas de frijol

Las mediciones correspondientes a los rasgos funcionales, así como los atributos foliares y de las raíces, se realizaron en el momento de mayor productividad del sistema, cuando las plantas eran reconocibles y tenían hojas (Salgado-Negrete, 2015). El proceso se llevó a cabo en el periodo de antesis alcanzado en julio de 2018. Se colectaron dos individuos por bloque, haciendo un subtotal de 8 individuos por tratamiento, lo cual dio total de 56 individuos analizados.

Los individuos fueron extraídos cuidadosamente del suelo para evitar que sus raíces se dañaran o rompieran, colocándolas en una bolsa etiquetada para su traslado. En el laboratorio de Edafología Ambiental, fueron lavadas con agua corriente para quitar el exceso de suelo adherido a las raíces y demás partículas en otras partes

de la planta, tratando de conservar la mayor cantidad posible de cada uno de sus fragmentos.

El peso fresco de hojas y raíces fue medido por separado en una balanza analítica con una resolución de 0.001 g, posteriormente fueron colocadas en bolsas de papel previamente etiquetadas y secadas en un horno a 60 °C por 24 horas, finalmente fueron pesadas para obtener la biomasa total y por partes.

### 5.5.1 Rasgos funcionales de hojas

Para que los datos de rasgos funcionales foliares fueran representativos, se seleccionaron hojas (5 por cada individuo) de 4 individuos por tratamiento (Salgado-Negret, 2015) es decir, un individuo por cada bloque, lo cual dio un total de 28 individuos utilizados. Se seleccionaron ramas con hojas expuestas al sol o en su defecto, las ramas menos sombreadas, se procuró que las hojas fueran jóvenes, pero totalmente expandidas, sin daños de herbívoros o patógenos (Garnier *et al.*, 2001).

#### 5.5.1.1 Espesor de la hoja (Esp)

Se realizaron 5 mediciones por hoja con ayuda de un vernier, evitando incluir las venas principales y el borde foliar. Las unidades en las que fue medido este rasgo fueron milímetros. Este rasgo está relacionado con el área foliar específica y la resistencia física de la hoja, además determina la cantidad de luz absorbida y la difusión de CO<sub>2</sub> en las hojas (Pérez-Hargindeguy *et al.*, 2013).

#### 5.5.1.2 Área Foliar Específica (AFE)

También conocido como SLA por sus siglas en inglés (*Specific Leaf Area*), se calculó dividiendo el área de una hoja compuesta por su masa seca, como se muestra a continuación:

$$AFE = \frac{\text{área foliar (cm}^2\text{)}}{\text{masa seca foliar (g)}}$$

Para obtener el área, se seleccionaron 5 hojas completamente desarrolladas de 28 individuos (4 plantas por cada tratamiento). Las hojas fueron lavadas en agua acidulada (ácido clorhídrico 0.1 molar), y se enjuagaron tres veces con agua destilada, se prensaron y secaron a 60°C por 72 horas.

Posteriormente, las hojas fueron escaneadas con un equipo Epson. Las imágenes fueron analizadas con ayuda del programa ImagePro 7.0 a una resolución de 800 píxeles. El programa nos proporcionó la superficie de los folíolos por separado y de manera manual, se realizó la suma de cada uno de los folíolos para obtener el valor total por hoja compuesta.

Una vez obtenida el área, los folíolos fueron puestos en bolsas de papel previamente etiquetadas y fueron secadas en el horno a 60 °C alrededor de 72 horas. Pasado el tiempo, las muestras fueron pesadas inmediatamente después de haber sido sacadas del horno para evitar su hidratación (Salgado-Negret, 2015).

#### 5.5.1.3 Densidad del tejido foliar (DTF)

También conocido como LTD por sus siglas en inglés (*Leaf Tissue Density*), se obtiene al realizar la división de la masa foliar seca entre el volumen de los folíolos (como se muestra en la fórmula). El volumen foliar fue obtenido al multiplicar el área total de los tres folíolos por el espesor promedio de las hojas.

$$DTF = \frac{\text{masa seca foliar (g)}}{\text{volumen fresco foliar (cm}^3\text{)}}$$

#### 5.5.1.4 Contenido foliar de biomasa seca (CFMS)

También es conocido como LDMC por sus siglas en inglés (*Leaf Dry Matter Content*), se obtiene al dividir la biomasa foliar seca y la biomasa fresca de la hoja saturada de agua, es decir:

$$CFMS = \frac{\text{masa seca foliar (g)}}{\text{masa fresca foliar (g)}}$$

### 5.5.2 Rasgos funcionales de raíz

Para la obtención de los rasgos funcionales radiculares, se utilizaron 35 raíces de individuos que correspondieron a una muestra de los 7 tratamientos por cada bloque. Las raíces fueron obtenidas introduciendo un trinche alrededor de la planta para aflojar el suelo, en donde se pudo identificar y rastrear las raíces secundarias y finas (< 2 milímetros) (Salgado-Negret, 2015). Por cuestiones de tiempo, una vez que las raíces fueron lavadas con agua corriente, se colocaron en bolsas de plástico previamente etiquetada con una solución de etanol al 70% y fueron refrigeradas para evitar su deshidratación (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013).

Fueron escaneadas a blanco y negro las 35 raíces utilizando una resolución de 200 ppi las cuales fueron archivadas en formato jpg. El proceso consistió en lavar las raíces con agua corriente para quitar el exceso de etanol, posteriormente fueron colocadas en una bandeja (deplexiglás) del tamaño de la pantalla del escáner con agua destilada, en ella se separaron las raíces cuidadosamente tratando de reducir los traslapes y así facilitar el ajuste del pixelaje para la interpretación por parte del software, también se trató de evitar que las raíces estuvieran cerca del borde de la bandeja (Gutiérrez, *et al.*, 2014).

Una vez escaneadas las raíces, se utilizó el software WinRizho® (Régent Instruments, Quebec-Canadá) para poder limpiar las imágenes de rayones o demás objetos que no pertenecieran a la raíz escaneada. El programa proporcionó una base de datos de la cual se tomaron los valores de longitud (cm), área proyectada y superficial (cm<sup>2</sup>) y volumen por clases de diámetro (0-0.50, 0.50-1, 1-1.50, 1.50-2, 2-2.50, 2.50-3, 3-3.50, 3.50-4, 4-4.50 mm). Posteriormente, las muestras de raíces fueron almacenadas y secadas, para después ser pesadas.

#### 5.5.2.1 Longitud radical específica (LRE)

También conocido como SLR por sus siglas en inglés (*Specific Length Root*), corresponde a la relación entre la longitud y el peso seco de las raíces finas (< 2 mm de diámetro) (Salgado-Negret, 2015) como se muestra en la siguiente fórmula:

$$LRE = \frac{\text{longitud de raíces finas}(m)}{\text{peso seco de raíces finas}(g)}$$

Debido a que la raíz completa estaba compuesta por raíces de diámetros >2mm, se tomó una submuestra (brazo) de cada individuo que comprendió los valores antes mencionados, el proceso llevado a cabo para obtener la longitud, área y volumen de esta submuestra se obtuvo con el programa WinRizho.

#### 5.5.2.2 Contenido radical de materia seca (CRMS)

Conocido también como RDMC por sus siglas en inglés (*Root Dry Matter Content*), es la masa seca de las raíces finas, dividida entre la masa fresca saturada de agua, como se muestra a continuación:

$$CRMS = \frac{\text{peso seco de raíces finas}(g)}{\text{peso fresco de raíces finas}(g)}$$

Altos valores de este rasgo están relacionados con alta densidad de los tejidos radicales e inversión en defensas estructurales, pero con bajas tasas de descomposición del tejido en el suelo. Este rasgo ofrece información similar a la densidad de la raíz, con la ventaja que es más sencillo de obtener (Salgado-Negret, 2015).

#### 5.5.2.3 Área superficial específica (ASE)

También es llamado SSA por sus siglas en inglés (*Specific Surface Area*), se obtuvo dividiendo el área de las raíces finas (<2mm) entre su masa seca:

$$ASE = \frac{\text{área de raíces finas}(cm^2)}{\text{peso seco de raíces finas}(g)}$$

#### 5.5.2.4 Densidad del tejido radical (DTR)

Conocido también como RTD (por sus siglas en inglés *Root Tissue Density*), este rasgo funcional hace referencia a la masa seca radical por unidad de volumen en fresco:

$$DTR = \frac{\text{masa seca radicular}(g)}{\text{volumen fresco de raíces}(cm^3)}$$

Presenta una relación positiva con el contenido radical de masa seca. Altos valores de densidad de tejido radical están correlacionados con una mayor resistencia a la ruptura, daños por herbívoros y la sequía, con menores tasas de descomposición y mayor longevidad, pero se relaciona negativamente con la absorción de nutrientes (Fortunel, *et al.*, 2012; Pérez-Harguindeguy, *et al.*, 2013).

#### 5.6 Análisis estadísticos

El crecimiento de las plantas de frijol se midió por medio de las variables altura, diámetro y cobertura, y fue visualizado por medio de gráficas con promedio y error estándar para las cuatro mediciones que fueron realizadas a lo largo del experimento, esta sección se presenta en el Anexo 2.

Para analizar las variables tanto de crecimiento (última medición), como de productividad y rasgos funcionales en función de los diferentes tratamientos, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía. En estos análisis se tomó en cuenta el diseño de bloques al azar implementado para considerar el efecto del gradiente lumínico en el crecimiento de las plantas. Las variables dependientes fueron las relacionadas con el crecimiento, la productividad y los rasgos funcionales, en contraparte, las variables independientes fueron los tratamientos y los bloques. En total se analizaron 4 variables de crecimiento: altura, diámetro y cobertura; 5 de productividad: biomasa total (biomasa de hojas, tallos y raíces), biomasa de vainas y semillas, biomasa de semillas, número de semillas y número promedio de nódulos; 8 rasgos funcionales, de los cuales cuatro correspondieron a hojas: espesor (Esp), área foliar específica (AFE), contenido foliar de masa seca (CFMS) y densidad del tejido foliar (DTF) y 4 fueron rasgos funcionales de raíces: densidad del tejido

radical (DTR), longitud radical específica (LRE), contenido radical de masa seca (CRMS) y área superficial específica (ASE).

En los análisis se planteó como hipótesis nula que las medias de los 7 tratamientos no se diferenciaban entre sí, con un nivel de significancia de  $P < 0.05$  (Minitab, 2019). Para comprobar que los residuos de los datos estuvieran distribuidos aleatoriamente y que tuvieran una varianza constante, se aplicaron las pruebas normalidad de Shapiro-Wilk ( $P < 0.05$ ) y homocedasticidad de Bartlett ( $P < 0.05$ ) respectivamente, así como de exploraciones visuales. Los datos que no cumplieron con los supuestos del ANOVA fueron transformados algebraicamente. Estas transformaciones cambiaron la forma de la distribución al cambiar las distancias entre los valores, pero mantuvieron el orden (Pérez, 2008). A los datos obtenidos se les aplicó la prueba de Tukey para identificar los grupos homogéneos. Adicionalmente se muestran gráficas con los promedios estimados por los modelos y sus errores estándar.

Para describir y conocer las posibles tendencias de covariación entre diferentes variables, se realizaron análisis de componentes principales (ACP) en cuatro grupos de datos: En el primer ACP se incluyeron las variables de crecimiento y la biomasa de las plantas junco con variables de suelo; el segundo ACP incluyó los valores de productividad de *Phaseolus vulgaris* L. y las variables físicas y químicas del suelo; En el tercer ACP se utilizaron los 8 rasgos funcionales foliares y radicales; por último, en el cuarto ACP además de los rasgos funcionales, se incluyeron las variables físicas y químicas del suelo. El Análisis de componentes principales permitió reducir la dimensión de los datos y detectar aquellas variables que covariaron entre sí y que tuvieron mayor influencia entre un grupo de variables (Peña, 2019). Además de que permitió disminuir la dimensión de los datos para facilitar la síntesis de los patrones asociados. (Estrada, 2018). Todos los datos fueron analizados con ayuda del software R V. 3.5.3.

## VI. Resultados

Los resultados están constituidos por diferentes secciones. La primera parte está conformada por los resultados de las variables de crecimiento (altura, diámetro y cobertura) y biomasa total (biomasa de hojas, tallos y raíces). En la segunda sección se tratan las variables de productividad (biomasa de vainas y semillas, biomasa de semillas, número de vainas y promedio de nódulos) de las plantas de frijol junto con variables físicas y químicas de los Tecnosoles. En todos los casos, se muestran los resultados obtenidos de los análisis de varianza junto con los análisis de Tukey. En estas secciones se incluyen los análisis de componentes principales (ACP) entre variables de crecimiento y productividad del frijol, y propiedades edáficas. En las secciones siguientes se muestra la evaluación edafocológica realizada a los 7 Tecnosoles y los resultados obtenidos de los análisis de varianza con sus pruebas de Tukey. Además, se muestran los ACP de los rasgos funcionales de hojas y raíces. En la última parte se muestran los resultados obtenidos en los análisis de componentes principales (ACP) entre los rasgos funcionales de hojas y raíces, y las variables del suelo.

### 6.1 Análisis del crecimiento y la productividad de las plantas de frijol.

#### 6.1.1 Altura

El ANOVA realizado para la variable altura arrojó un valor  $P < 0.001$  (Cuadro 1), por lo que se rechazó la hipótesis nula planteada y se concluyó que no todas las medias de los 7 tratamientos eran iguales y que existían diferencias significativas entre ellos. A esta variable (al igual que a las variables cobertura y diámetro) se le realizó una transformación de tipo algebraica (raíz cuadrada). Se aplicó una prueba de Tukey (95%), la cual nos manifestó la existencia de al menos cinco grupos homogéneos (Cuadro 1). Los grupos que no comparten una letra (“a”, “b”, “c” o “d”) son significativamente diferentes (Minitab, 2019).

En la Figura 3 se puede observar el valor promedio obtenido en cada bloque (con datos sin transformar), así como el valor promedio para cada tratamiento y los grupos homogéneos. Se observa que el tratamiento 3 resultó ser el tratamiento con alturas significativamente menores a los demás (alrededor de 20 cm de altura), por

ello fue diferente a los demás tratamientos. En contraste, el tratamiento con la media más alta fue el tratamiento 7 (por arriba de los 45 cm), mismo que compartió similitudes con los tratamientos 2, 4, 5 y 6. En cuanto a los bloques, el 4 tuvo los valores más bajos (a excepción de los tratamientos 4 y 5) y el bloque 2, tuvo los valores más altos en los tratamientos 5, 6 y 7.

Cuadro 1. ANOVA y prueba de Tukey con los datos de la última medición de altura.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	14.3	24.1	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	4.3	7.2	<b>&lt;0.001</b>
Residuales	142	0.6		
Tratamiento	Media de Mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	5.6	0.19	142	b
2	6.4	0.15	142	cd
3	4.5	0.17	142	a
4	6.6	0.14	142	cd
5	6.3	0.17	142	bcd
6	6.2	0.17	142	bc
7	6.9	0.15	142	d

*Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.*

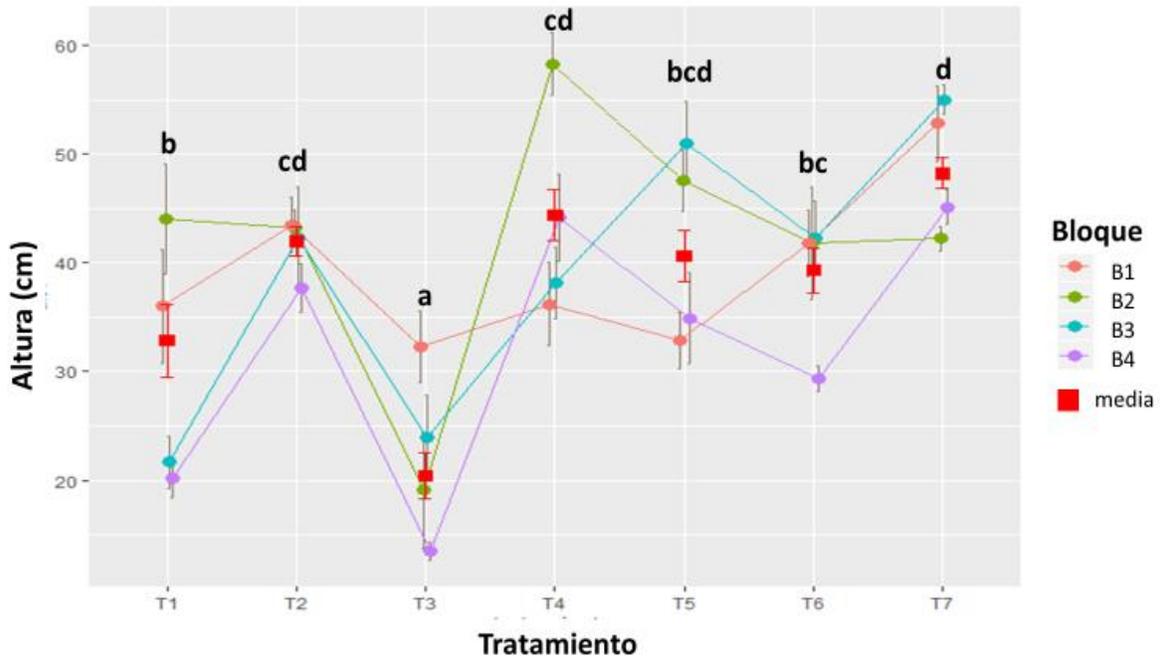


Figura 3. Modelo obtenido para la última medición de la variable altura (80 días). Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con las letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.1.2 Diámetro del tallo

En esta variable el ANOVA se realizó con los valores transformados con raíz cuadrada. El análisis nos arrojó un valor  $P < 0.001$  (Cuadro 2), lo cual reveló la existencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. Al aplicar la prueba de Tukey, nos mostró la existencia de 6 grupos homogéneos (Cuadro 2). La prueba Shapiro-Wilk dio como resultado un valor de  $P 0.335$ . En el caso de la homocedasticidad de los datos, se realizó una prueba visual.

En la Figura 4 se observan los valores promedio de la variable diámetro sin ser transformados obtenidos por bloque, así como la media por tratamiento y los grupos homogéneos, obtenidos en la última medición. Se encontró que al igual que en la altura de la planta, el tratamiento 3 presentó los valores medios más bajos (por debajo de 6 mm), mientras que los tratamientos 5 y 7 tuvieron los valores medios más altos (arriba de 9 mm), seguidos de los tratamientos 2 y 6 (con valores medios superiores a 8 mm). En cuanto a los bloques, el 4 presentó los valores más bajos

(a excepción del tratamiento 2 y 4), mientras los bloques 2 y 3 tuvieron los valores más altos.

Cuadro 2. ANOVA y prueba de Tukey con los datos de la última medición de la variable diámetro del tallo.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	1.4	18.9	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	0.3	4.6	<b>0.004</b>
Residuales	142	0.1		
Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	2.6	0.06	142	ab
2	2.9	0.05	142	cd
3	2.4	0.06	142	a
4	2.8	0.05	142	bc
5	3.1	0.06	142	d
6	2.9	0.06	142	bcd
7	3.1	0.05	142	d

Probabilidades significativas se encuentran en negritas.

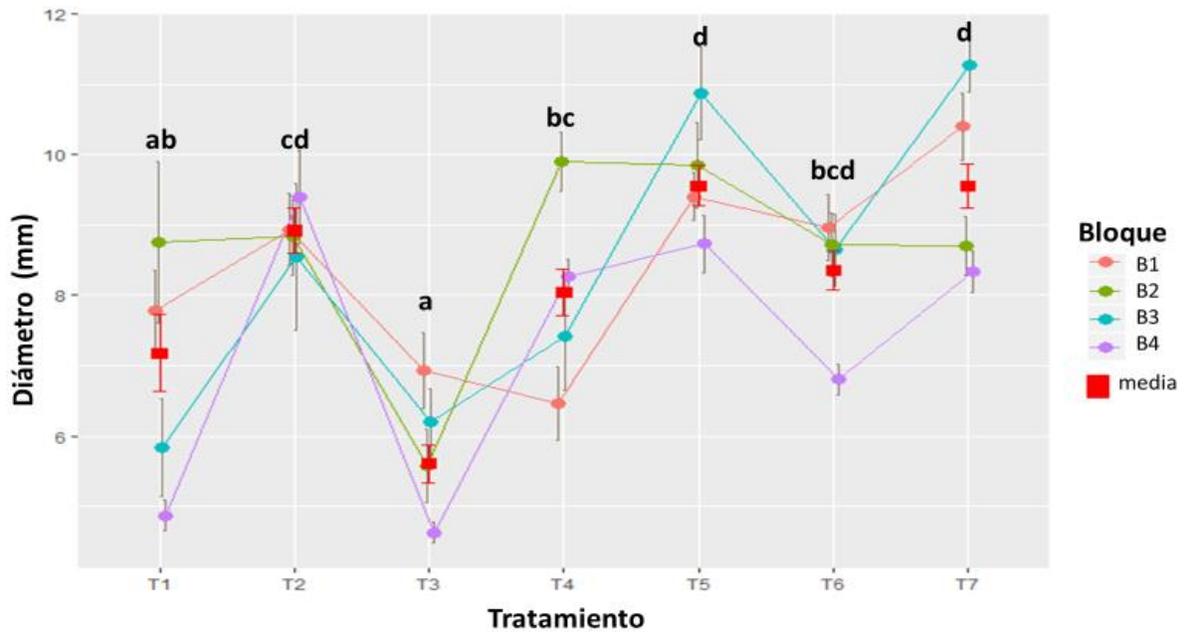


Figura 4. Modelo obtenido para la última medición del diámetro de las plantas (80 días). Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con las letras a, b, c y d.

### 6.1.3 Cobertura de la planta

Los resultados obtenidos en el ANOVA realizado a los datos transformados con raíz cuadrada para la variable cobertura, arrojaron un valor  $P < 0.001$  (Cuadro 3), por lo cual se pudo aseverar que no todas las medias de los 7 tratamientos eran iguales. La prueba de Tukey nos mostró la existencia de al menos 4 grupos homogéneos (Cuadro 3).

La cobertura de las plantas a los 80 días con los datos sin ser transformados (Figura 5), tuvieron un comportamiento similar a la variable anterior. El tratamiento 3 fue diferente a todos los demás tratamientos con los valores medios más bajos (alrededor de los 500 cm<sup>2</sup>), a diferencia de los tratamientos 5 y 7 que presentaron los valores más altos, mayores a 1500 cm<sup>2</sup>. Cabe mencionar que los tratamientos 2, 4 y 6 compartieron similitudes con los tratamientos en donde se presentaron los valores más altos. Para el caso de los bloques por cada tratamiento, se puede observar de manera general, que los resultados fueron mayormente favorables en los bloques 2 y 4, mientras que en los bloques 1 y 4, el promedio de los valores resultó menor.

Cuadro 3. ANOVA y prueba de Tukey realizada con los datos de la última medición de la variable cobertura.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	958.5	19.9	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	269.3	5.6	<b>0.001</b>
Residuales	142	48.3		
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	32.9	1.74	142	b
2	38.9	1.40	142	bc
3	22.6	1.60	142	a
4	38.2	1.31	142	bc
5	41.1	1.56	142	c
6	36.8	1.59	142	bc
7	42.6	1.39	142	c

Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.

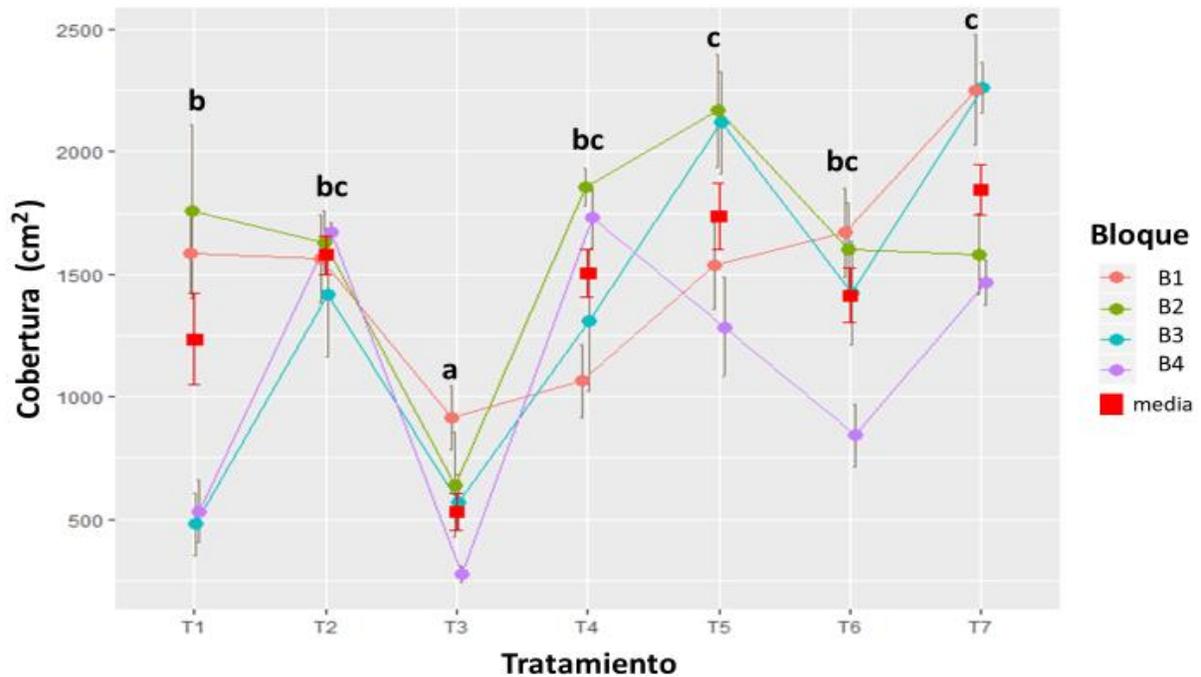


Figura 5. Modelo obtenido en la última medición de la cobertura de las plantas (80 días). Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con las letras minúsculas a, b, c y d.

#### 6.1.4 Biomasa total (BTo)

Para el caso de biomasa total, se tomó en cuenta el peso seco de hojas, tallos y raíces. Los datos tuvieron que ser transformados (raíz cuadrada) para cumplir con los supuestos del ANOVA. Este análisis proporcionó una  $P < 0.001$  para el nivel de tratamiento (Cuadro 4), lo cual nos indicó que las medias de los tratamientos eran diferentes. La prueba de Tukey reveló la existencia de dos grupos homogéneos (Cuadro 4).

En la Figura 6, se muestran los valores promedio por tratamiento y por bloque de los datos sin haber sido transformados de la variable biomasa total, así como los grupos homogéneos obtenidos en la prueba de Tukey. Se puede observar que únicamente el tratamiento 3 presentó diferencias significativas en comparación con los otros 6 tratamientos, pues tuvo los valores más bajos (promedios menores a 10 g), al resto de los tratamientos. Las diferencias entre los demás tratamientos fueron nulas, lo cual indica que su desempeño fue similar a pesar de que se encontraban en diferentes sustratos.

Cuadro 4. ANOVA y prueba de Tukey realizados con los datos de biomasa de las plantas de frijol.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	15.334	13.380	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	2.165	1.889	0.135
Residuales	131	1.146		
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	3.7	0.23	131	b
2	4.3	0.23	131	b
3	1.9	0.24	131	a
4	3.7	0.24	131	b
5	4.3	0.23	131	b
6	3.8	0.24	131	b
7	4.4	0.25	131	b

Las probabilidades significativas se muestran en negritas.

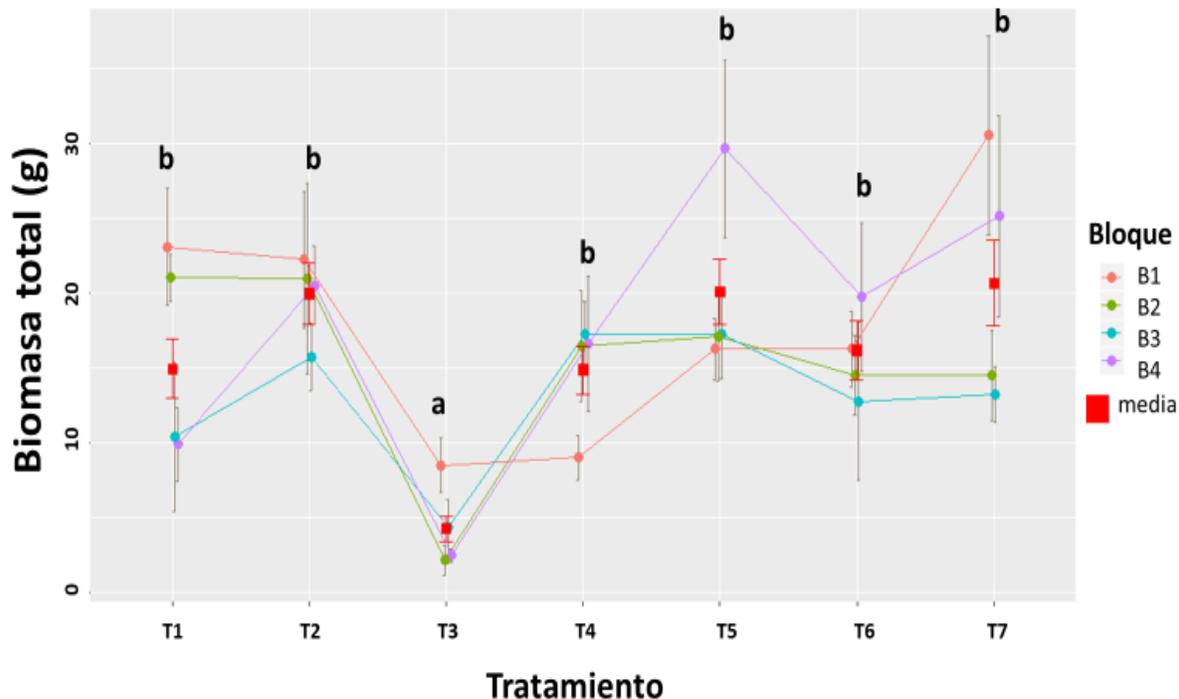


Figura 6. Modelo obtenido para la biomasa total de las plantas de frijol. Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

## 6.2 Análisis de Componentes Principales de las variables de crecimiento y biomasa

En el análisis de componentes principales realizado con las variables de crecimiento, biomasa total (que incluye la biomasa de la planta: hojas, tallos y raíces), promedio de número de nódulos, relación C/N y variables físicas y químicas de los Tecnosoles, se obtuvo que los dos primeros componentes principales lograron explicar el 58.5% de la variación de los datos, agregando un tercer componente se explicó el 73.6% de la variación. (Cuadro 5). En el componente principal 1 (CP1) tuvieron un valor significativo las variables de crecimiento (altura, cobertura y diámetro) y biomasa, así como algunas variables de suelo. En el caso del componente principal 2 (CP2), las variables de suelo tomaron mayor relevancia junto con el promedio de número de nódulos. Lo mismo sucedió en el componente principal 3 (CP3), porque en este caso, tomaron relevancias únicamente variables de suelo con covariaciones en diferentes sentidos (Cuadro 6).

Cuadro 5. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre variables de crecimiento, biomasa y variables de suelo.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	2.38	2.20	1.65
Proporción de varianza explicada	31.4%	27.1%	15.1%
Proporción acumulada	31.4%	58.5%	73.6%

En la Figura 7 se muestra a detalle las covariaciones resultantes entre el CP1 vs el CP2, así como el acomodo de cada tratamiento en el análisis. En el componente principal 1 se observa de manera clara que las variables de crecimiento y biomasa total covariaron de manera positiva entre sí, agrupándose en el cuadrante positivo de este componente. Asimismo, se localizaron en este cuadrante algunos valores de los tratamientos 2 y 5, con resultados favorecedores en las variables de crecimiento y biomasa. La relación C/N, la porosidad total y el pH, covariaron de manera contraria, pues se localizaron en el cuadrante opuesto del componente 1.

Cuadro 6. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y suelo.

	CP1	CP2	CP3
BTo	<b>0.68</b>	0.06	-0.07
Diámetro	<b>0.78</b>	0.10	0.03
Altura	<b>0.81</b>	-0.02	0.06
Cobertura	<b>0.76</b>	-0.05	-0.01
Densidad aparente	0.34	0.42	<b>0.81</b>
Densidad real	0.10	<b>0.88</b>	0.45
Porosidad total	-0.38	-0.05	<b>-0.88</b>
pH	<b>-0.67</b>	<b>-0.52</b>	0.41
Conductividad eléctrica	-0.33	<b>0.59</b>	0.41
C	0.00	<b>-0.93</b>	-0.08
N	<b>0.59</b>	<b>-0.60</b>	-0.22
P	0.15	<b>0.95</b>	0.07
K	-0.40	0.07	<b>0.69</b>
Ca	<b>0.62</b>	0.27	<b>0.61</b>
Mg	0.40	-0.21	<b>-0.64</b>
Relación C/N	<b>-0.87</b>	-0.18	0.07
Número de nódulos	0.23	<b>0.63</b>	-0.15
CRAD	0.31	0.38	<b>-0.63</b>

Donde: Biomasa total (BTo); Capacidad de retención de agua disponible (CRAD).  
 Los valores representativos se muestran en negritas.

En este cuadrante también se visualizan datos del tratamiento 3, el cual tuvo resultados desfavorables, pues obtuvo los valores más bajos para las variables de crecimiento y biomasa. En el caso del CP2, se observa que las variables de suelo densidad real, P, conductividad eléctrica y capacidad de retención de agua disponible, covariaron de forma positiva con el promedio de número de nódulos por tratamiento, de manera contraria, en el cuadrante negativo de este mismo componente, se localizó el vector de C y N. Aquí se localizaron valores de los tratamientos 4, 6 y 7, los cuales también obtuvieron resultados favorecedores en las variables de biomasa total y crecimiento.

En la Figura 8 se muestra la covariación entre el CP1 y CP3, se observa el mismo comportamiento en el CP1. En el caso del CP3 se observa que los vectores que tuvieron una magnitud relevante fueron, por un lado, las variables densidad aparente, K y Ca, covariaron de manera positiva, mientras que de manera contraria los vectores porosidad total, Mg y la capacidad de retención de agua disponible,



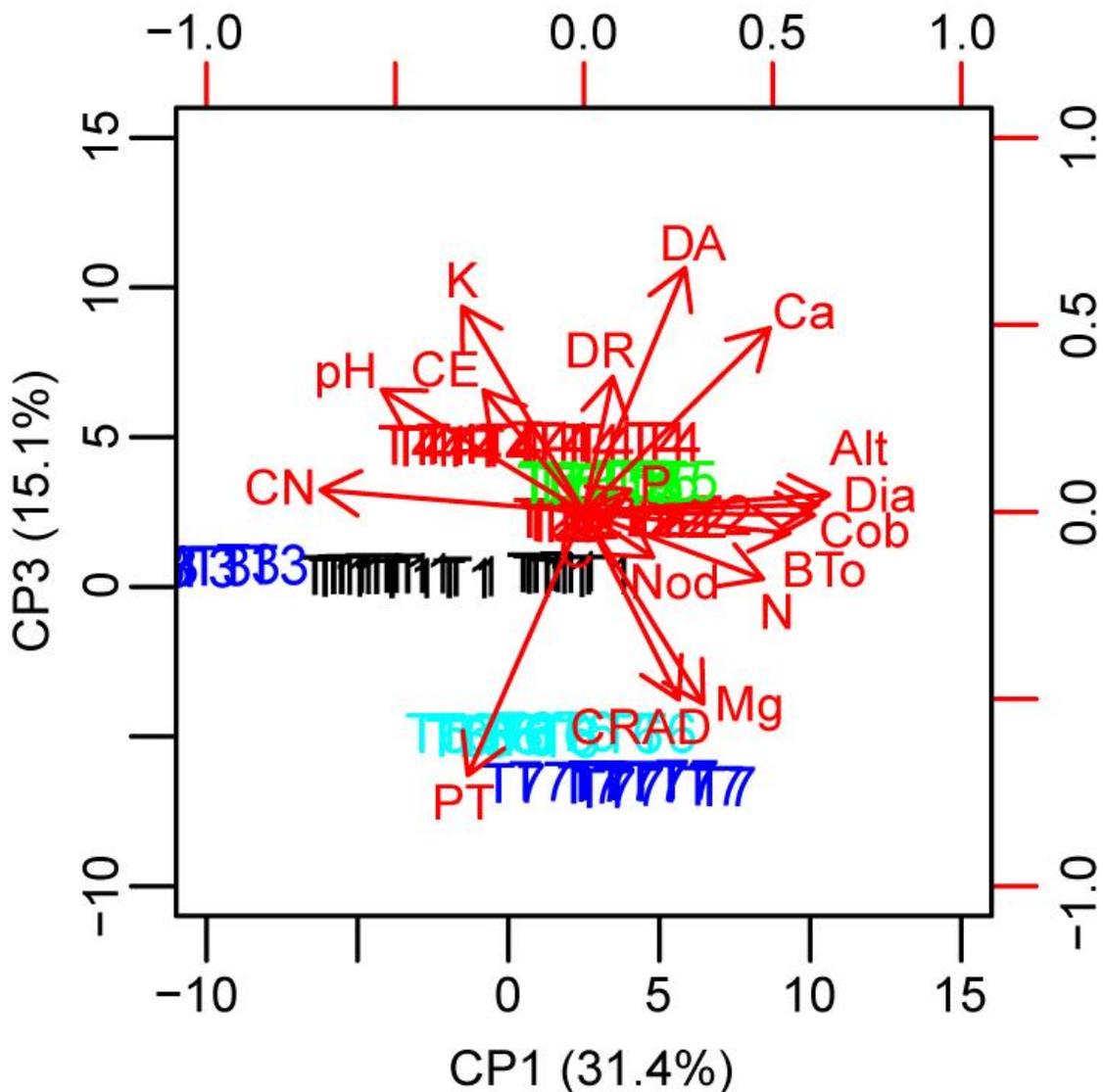


Figura 8. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa (peso seco total y promedio de número de nódulos por tratamiento) y suelo. Se muestra la covariación entre en CP1 y CP3.

### 6.3 Productividad de *Phaseolus vulgaris* L.

En este apartado se muestra la distribución de los datos por medio de análisis de varianza y de gráficas con los valores promedio por tratamiento y por bloque para las variables de productividad medidas: biomasa total de la planta (BTo), biomasa de vainas y semillas (BVS), biomasa de semillas (BS) y número de vainas (NV). Los datos fueron transformados a raíz cuadrada para cumplir con los supuestos del ANOVA.

### 6.3.1 Biomasa de vainas (BV)

En el ANOVA realizado a los datos transformados con la raíz cuadrada de la biomasa de vainas (BV), se encontraron diferencias significativas tanto en los tratamientos como en los bloques, con  $P < 0.001$  (Cuadro 7). Asimismo, el análisis de Tukey estableció la existencia de al menos 5 grupos homogéneos entre tratamientos.

Cuadro 7. ANOVA y prueba de Tukey realizado con los datos de la variable biomasa de vainas y semillas.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	4.589	4.963	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	16.005	17.311	<b>&lt;0.001</b>
Residuales	289	0.925		
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	3.6	0.14	289	ab
2	4.1	0.14	289	bc
3	3.3	0.16	289	a
4	4.2	0.13	289	c
5	3.9	0.14	289	abc
6	4.1	0.15	289	bc
7	4.2	0.15	289	bc

*Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.*

En la Figura 9 se pueden ver los valores promedio y error estándar por tratamientos y bloques sin transformar. Los valores más bajos de biomasa de vainas y semillas recayeron en los tratamientos 1 y 3 con 15 g o menos. En contraste, los valores más altos de peso seco de vainas se tuvieron en el tratamiento 4. Asimismo, se observa que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos 1 y 3, pues tuvieron los valores promedio más bajos. También se observa que a pesar de que el tratamiento 4 tuvo el valor promedio más alto, éste no presentó diferencias significativas con los tratamientos 2, 6 y 7.

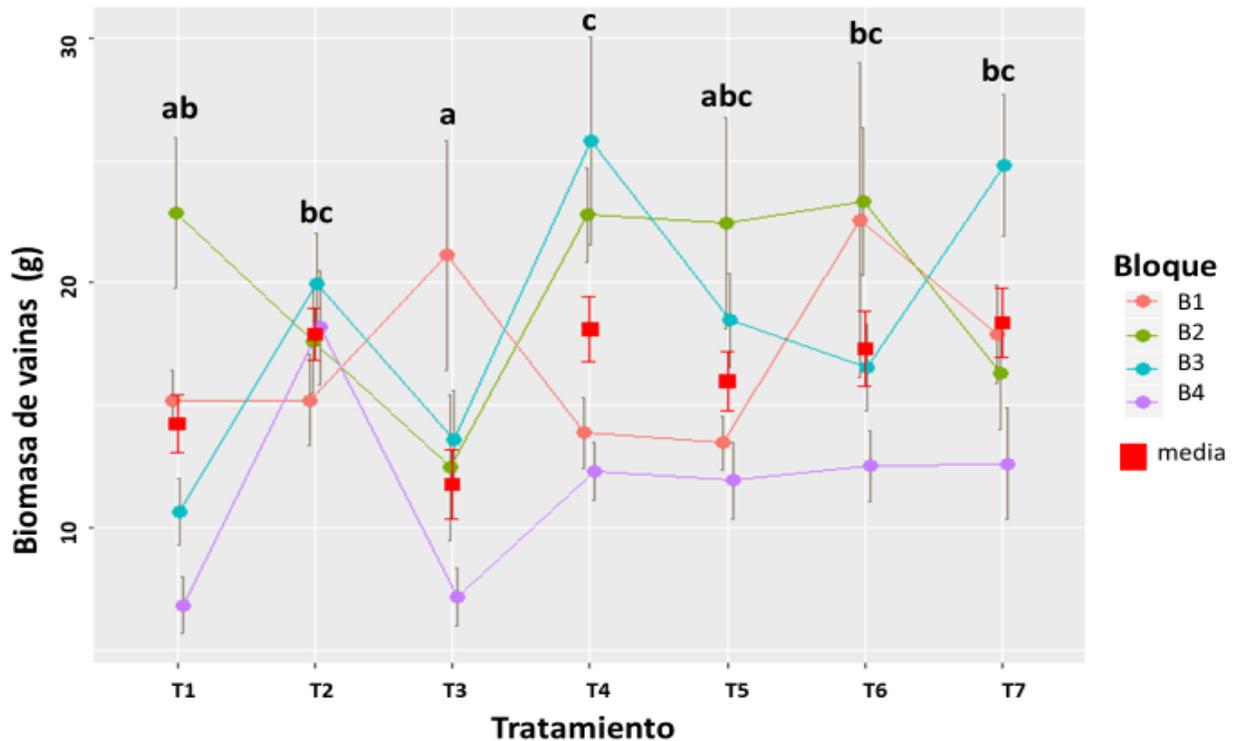


Figura 9. Modelo obtenido para la biomasa de vainas por planta. Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras a, b, c y d.

### 6.3.2 Biomasa de semillas (BS)

En el ANOVA realizado a los datos transformados (raíz cuadrada) de biomasa de semillas se obtuvo un valor  $P < 0.001$  (Cuadro 8), de acuerdo con la hipótesis nula planteada, se establece que las medias de los 7 tratamientos no son iguales, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existen diferencias significativas entre los tratamientos. La prueba de Tukey estableció la existencia de al menos 4 grupos homogéneos los cuales se ven representados por diferentes letras para cada tratamiento (Cuadro 8), los grupos que no comparten una letra (“a”, “b”, “c” o “d”) son significativamente diferentes (Minitab, 2019).

En la Figura 10 se puede observar el promedio por bloque y por tratamiento de los valores sin transformar de la biomasa seca de semillas, incluyendo los grupos homogéneos. También se puede observar que el tratamiento 3 presentó los valores promedio más bajos (alrededor de los 25 g de semillas por planta), a diferencia de

los tratamientos 2 y 7 los cuales tuvieron valores promedio alrededor de 50 g de semillas por planta. En la Figura 3.0 también se puede observar que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos 2, 4, 5, 6 y 7, en todos ellos se obtuvieron valores promedio entre 25 y 60 g.

Cuadro 8. ANOVA y prueba de Tukey realizado con los datos de la variable biomasa de semillas.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	34.86	10.76	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	82.57	25.49	<b>&lt;0.001</b>
Residuales	289	3.24		
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	5.9	0.28	289	ab
2	7.3	0.26	289	c
3	5.0	0.31	289	a
4	7.2	0.25	289	c
5	7.2	0.26	289	c
6	6.6	0.28	289	bc
7	7.5	0.28	289	c

*Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.*

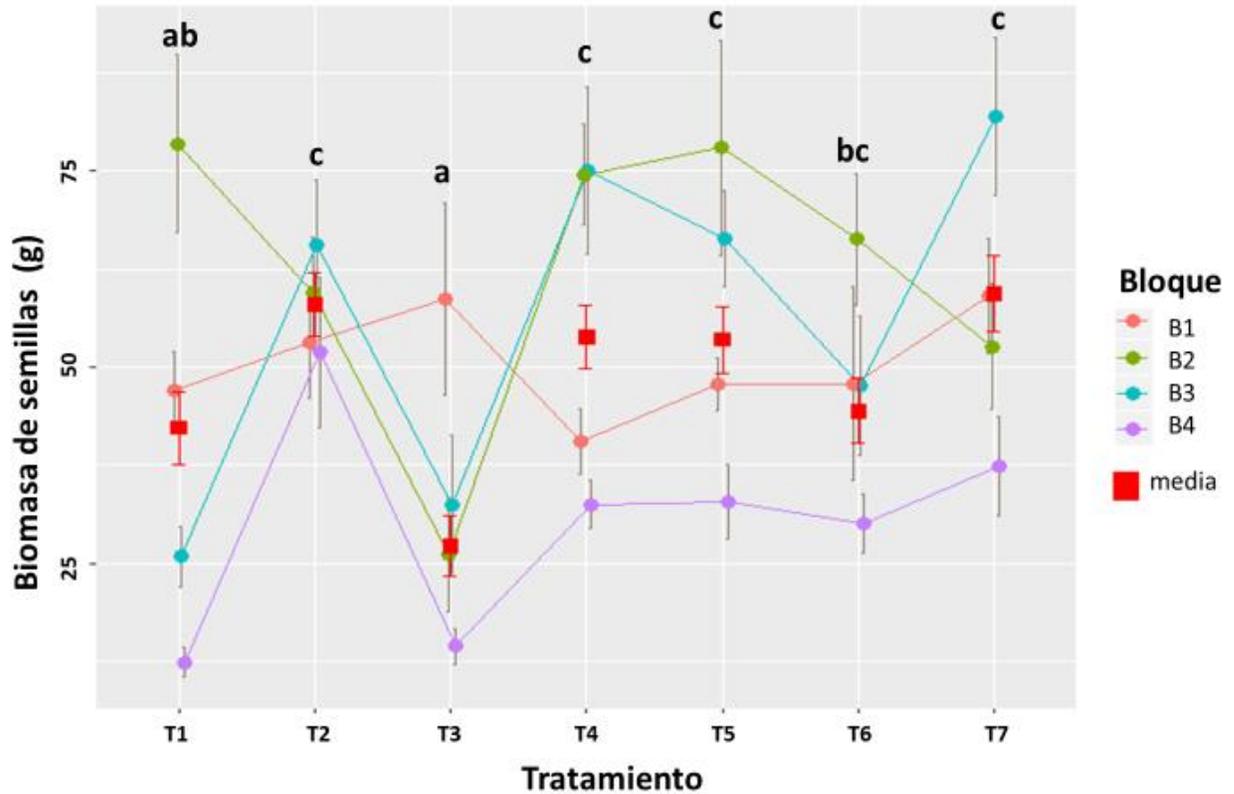


Figura 10. Modelo obtenido para la biomasa de semillas obtenidos por planta de frijol. Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.3.3 Número de vainas (NV)

En el ANOVA realizado para los valores transformados con raíz cuadrada del número de vainas, se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos y bloques con valores  $P < 0.001$  (Cuadro 9). Asimismo, en la prueba de Tukey realizada se obtuvieron al menos 5 grupos homogéneos entre los diferentes tratamientos, los cuales se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. ANOVA y prueba de Tukey realizados con los datos de realizados de la variable número de vainas.

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	11.64	3.903	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	46.05	15.440	<b>&lt;0.001</b>
Residuales	289	2.98		

Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	6.7	0.26	289	ab
2	7.5	0.25	289	abc
3	6.4	0.29	289	a
4	7.6	0.24	289	bc
5	7.1	0.25	289	abc
6	7.9	0.27	289	c
7	7.6	0.27	289	abc

*Las probabilidades significativas se muestran en negritas.*

Al igual que en variables previas, el tratamiento 3 tuvo los valores más bajos con un promedio de 40 vainas por planta (Figura 11). El tratamiento con los valores más altos obtenidos fue el 6, aunque como se puede observar en la misma figura, no se encontraron diferencias significativas entre este tratamiento y los tratamientos 4 y 7 pues todos ellos tuvieron valores promedio superiores a las 50 vainas por planta. La Figura 11 también nos muestra que el tratamiento 6 tuvo similitud con los tratamientos 1, 2 y 5, coincide con que estos tratamientos tuvieron valores promedio menores a los anteriormente señalados.

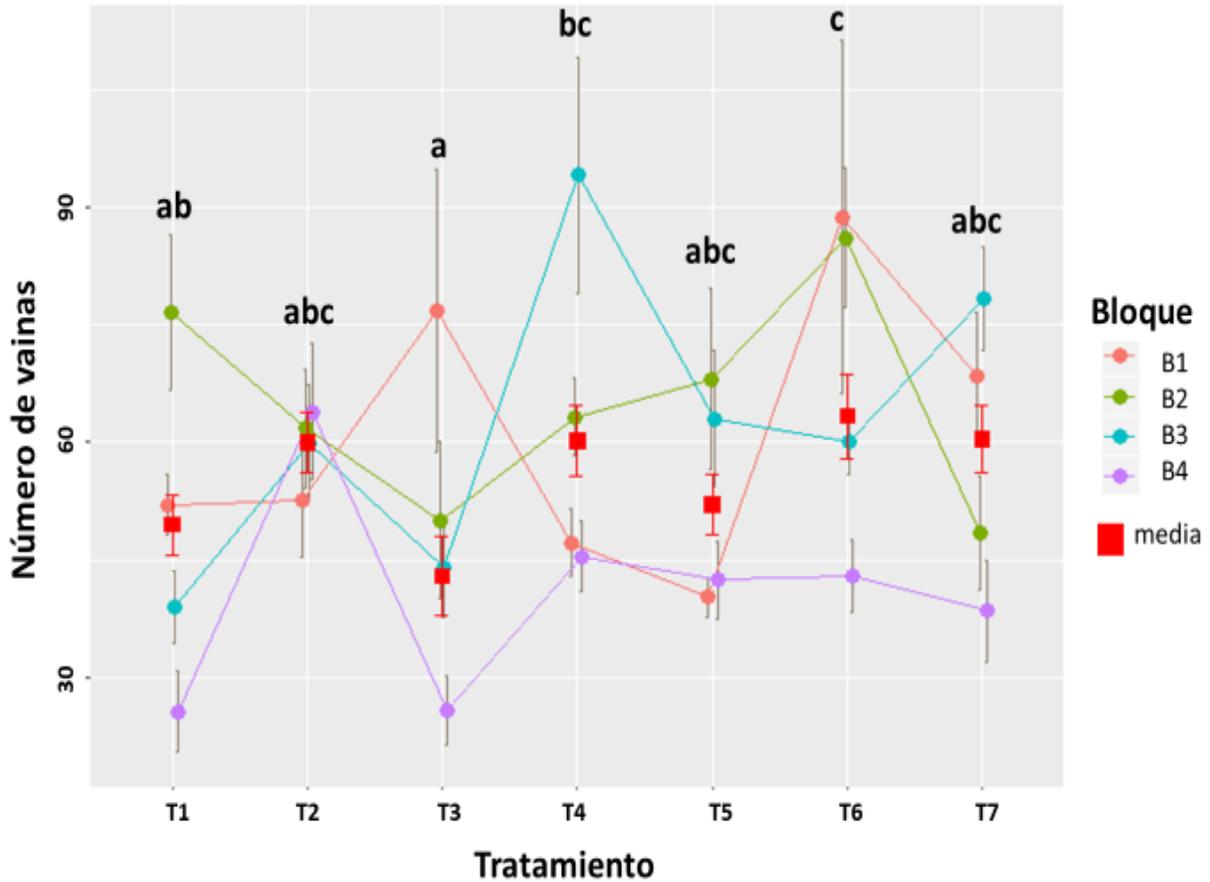


Figura 11. Modelo obtenido para el número de vainas por planta de frijol. Se puede observar el valor promedio y error estándar obtenido en cada bloque y por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras a, b, c y d.

### 6.3.4 Número de nódulos (NN).

El ANOVA dio como resultado, altas diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 10). En la prueba de Tukey, se observa la existencia de al menos 4 grupos homogéneos (Cuadro 10). El primer grupo se conformó por los tratamientos 1, 3, 4 y 5, con los valores más bajos de número de nódulos por planta. El segundo grupo estuvo conformado únicamente por el tratamiento 2, con valores medios. El tercer grupo sólo incluyó al tratamiento 6, aunque este tratamiento también compartió similitudes con los dos grupos anteriores. Por último, el grupo cuarto fue constituido por el tratamiento 7, que tuvo la mayor cantidad de nódulos.

Cuadro 10. ANOVA y prueba de Tukey realizadas con los datos del rasgo número de nódulos (NN).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	20941	15.875	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	513	0.77	0.522
Residuales	18	3957	-	-
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados libertad	de Grupos
1	10.0	7.41	18	a
2	59.5	7.41	18	b
3	22.3	7.73	18	a
4	12.1	6.72	18	a
5	17.7	7.73	18	a
6	34.7	7.72	18	ab
7	99.1	8.73	18	c

Las probabilidades significativas, se muestran en negritas.

#### 6.4 Análisis de Componentes Principales de la productividad y las propiedades físicas y químicas del suelo

Se realizó un análisis de componentes principales de las variables físicas y químicas del suelo, junto con las variables de productividad de *Phaseolus vulgaris*, que fueron la biomasa de vainas y semillas (BVS), la biomasa de semillas (BS), y el número de vainas (NV). Este ACP tuvo una variación acumulada entre los dos primeros componentes de 56.3% y al integrar el componente 3, la variación aumentó a 72.5% (Cuadro 11).

En Cuadro 12 tenemos los valores de covariación entre los tres primeros componentes. Se encontró que hubo una fuerte covariación positiva en el CP1, entre las variables densidad aparente y real, así como con la conductividad eléctrica, P y Na, mientras que de manera opuesta las variables de C, N y Mg covariaron de manera negativa en este mismo componente. Tenemos entonces que el CP1 refleja las variables físicas y químicas de los Tecnosoles.

Cuadro 11. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales para variables de productividad y propiedades físicas y químicas del suelo.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	2.32	2.04	1.66
Proporción de varianza explicada	32%	25%	16.2%
Proporción acumulada	32%	56.3%	72.5%

Por otro lado, el CP2 nos mostró una covariación positiva entre las variables de productividad: biomasa de vainas y semillas, peso de seco de semillas y número de vainas, junto con las variables de suelo densidad aparente y Ca, mientras que, en el cuadrante opuesto, tomaron relevancia las variables relación C/N y porosidad total. En el CP3 también se vieron reflejadas variables físicas y químicas del suelo, en este caso las variables que covariaron de manera positiva fueron pH, C, K y relación C/N, mientras que solo la capacidad de retención de agua disponible covarió de manera negativa.

En la Figura 12, se observa la distribución de los 7 diferentes tratamientos según las variables de productividad y las edáficas entre el componente principal 1 y 2. En el cuadrante positivo del primer componente se localizaron los tratamientos 2 y 5, en donde los vectores de las variables de suelo conductividad eléctrica, densidad real y aparente, fósforo, así como la variable promedio de nódulos, tuvieron los vectores más representativos. Esto podría implicar menor porosidad, lo que a su vez ocasiona que no haya suficiente cantidad de agua requerida para las plantas. En el cuadrante negativo del componente principal 1 que podríamos asociar con una mejor calidad, fue donde se encontraron situados los tratamientos 4, 6 y 7, considerados de los mejores tratamientos por poseer un alto contenido de materia orgánica de fácil degradación además de que en estos tratamientos los resultados de crecimiento fueron favorecedores. En este cuadrante también se vieron asociados los vectores de los nutrimentos C, N y Mg, así como la variable de suelo pH. En el caso del componente principal 2, todas las variables de productividad se

concentraron en el cuadrante positivo donde se presentaron algunos datos del tratamiento 4, 5 y 7, los cuales presentaron valores favorecedores para dichas variables. En contraparte, en el cuadrante negativo del componente principal 2, se situaron los valores de los tratamientos 1 y 3, mismos que covariaron en el mismo sentido del vector de porosidad total y la relación C/N.

Cuadro 12. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes principales del análisis de componentes principales de las variables de productividad y propiedades físicas y químicas del suelo.

	CP1	CP2	CP3
BVS	-0.13	<b>0.74</b>	-0.11
BS	-0.10	<b>0.74</b>	-0.12
NV	-0.21	<b>0.62</b>	0.00
Densidad aparente	<b>0.68</b>	<b>0.63</b>	0.11
Densidad real	<b>0.91</b>	0.27	-0.29
PT	-0.41	<b>-0.70</b>	-0.35
pH	0.03	-0.26	<b>0.95</b>
Conductividad eléctrica	<b>0.73</b>	-0.04	0.16
C	<b>-0.80</b>	0.03	<b>0.54</b>
N	<b>-0.81</b>	0.37	-0.04
P	<b>0.87</b>	-0.16	0.36
K	0.43	0.14	<b>0.64</b>
Ca	0.40	<b>0.75</b>	-0.09
Mg	<b>-0.70</b>	-0.01	-0.42
Na	<b>0.75</b>	-0.07	-0.07
CN	0.11	<b>-0.60</b>	<b>0.64</b>
Nod	0.33	0.13	-0.51
CRAD	-0.17	-0.12	<b>-0.83</b>

Donde: biomasa de vainas y semillas (BVS); biomasa de semillas (BS); número de vainas (NV); porosidad total (PT); relación carbono/nitrógeno (CN); promedio de nódulos (Nod); y capacidad de retención de agua disponible (CRAD). *Los valores representativos se encuentran en negritas.*

En la Figura 13 se muestra la distribución que tuvieron los 7 tratamientos junto con los vectores de productividad y propiedades físicas y químicas del suelo, con los componentes principales 1 y 3. En estos dos componentes, las variables de productividad: biomasa de vainas y semillas no tomaron relevancia, únicamente la variable de suelo capacidad de retención de agua disponible. En el componente principal 1 los vectores más representativos fueron el promedio de nódulos, el C y

N, mientras que en el componente principal 3, los vectores más representativos fueron el K, la relación C/N, Mg, porosidad total y la capacidad de retención de agua disponible.

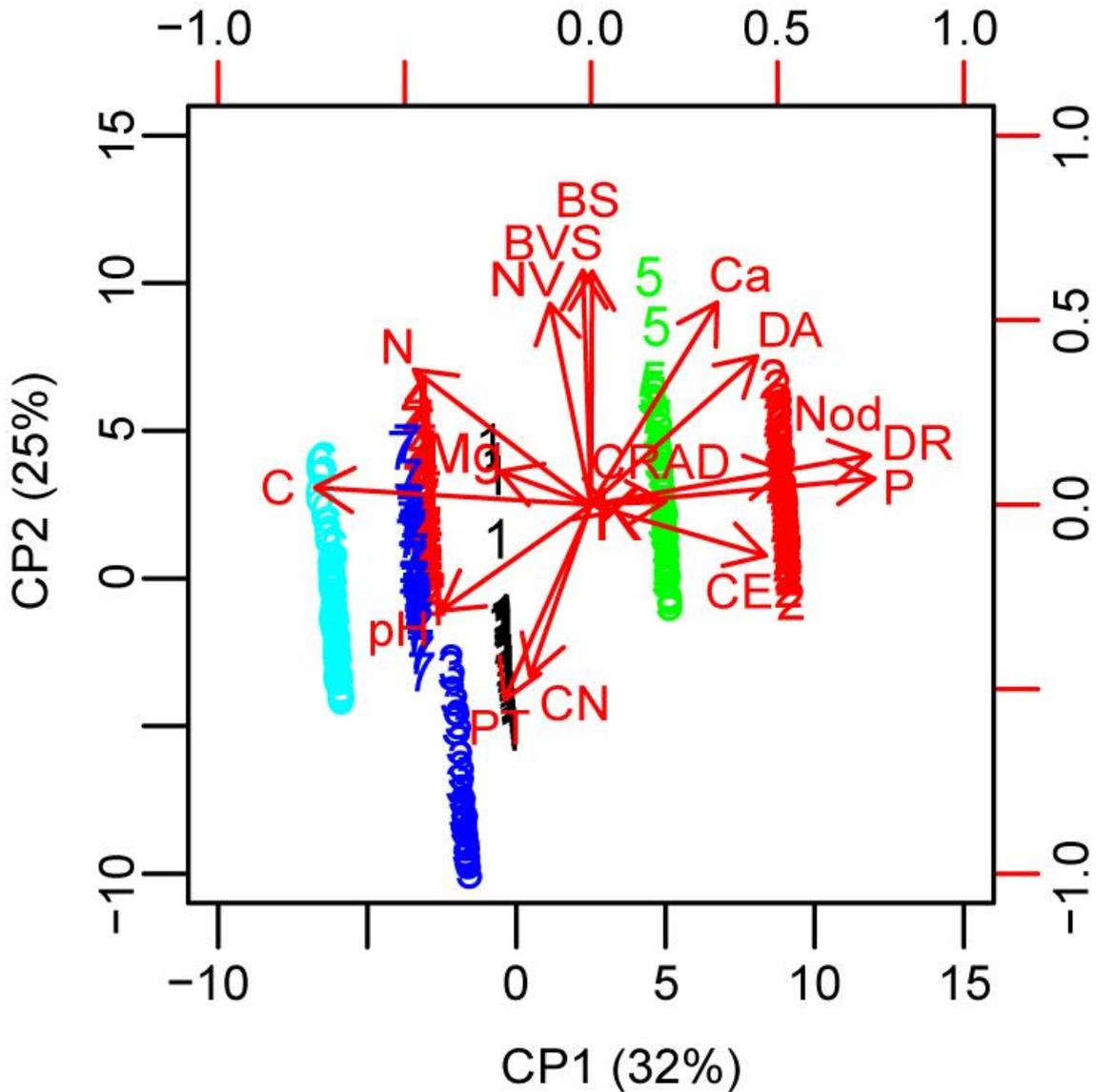


Figura 12. Representación gráfica del análisis de componentes principales (componentes 1 y 2) de las variables de productividad: biomasa de vainas y semillas (BVS), biomasa semillas (BS), número de vainas (NV), promedio de nódulos (Nod) y (CRAD), con las variables físicas y químicas de los Tecnosoles.

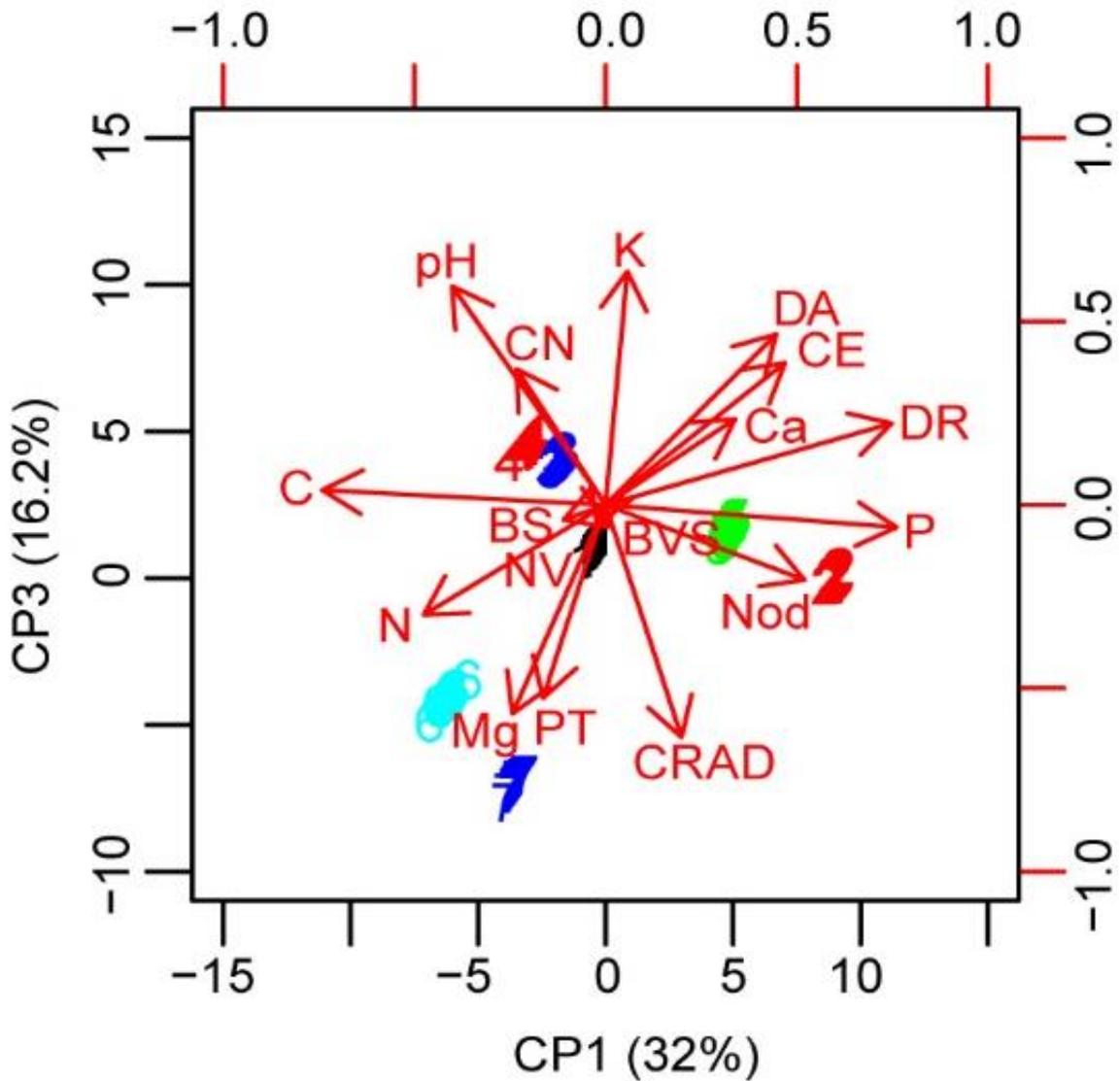


Figura 13. Representación gráfica del análisis de componentes principales (componentes 1 y 3) de las variables de productividad: biomasa semillas y vainas (BVS), biomasa semillas (BS), número de vainas (NV), promedio de nódulos (Nod) y (CRAD), con las variables físicas y químicas de los Tecnosoles.

### 6.6 Evaluación edafocológica de los siete Tecnosoles elaborados para el cultivo de frijol

En este apartado se presentan las evaluaciones edafocológicas realizadas a los siete tratamientos, con base en el manual para la descripción y evaluación de suelos en campo (Siebe *et al.*, 2016). En este caso se realizó una pequeña modificación en la evaluación, para tomar en consideración si la propiedad edáfica favorece el

crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol. La evaluación es un gradiente que califica la calidad de la propiedad, en un intervalo que va de malo a muy bueno (Cuadro 13). En la segunda parte del cuadro se resumen los resultados del desempeño de las plantas de frijol, obtenidos en los análisis de varianza y se evalúan de la misma forma que las propiedades edáficas.

#### 6.6.1 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de excavación, composta-biocarbón, lombricomposta y trozos de madera

Los tratamientos 1, 2 y 3 tenían en común que contenían residuos de excavación (al 30% de su volumen total), el primer tratamiento fue mezclado con composta y biocarbón (25% y 20% respectivamente), el segundo con lombricomposta (45%) y el tercero carecía de composta, pero contenía biocarbón en mayor proporción (45%). Los tres tratamientos contenían un 25% de trozos de madera.

El residuo de excavación que empleamos es una mezcla de concreto, cascajo y suelo natural, muy heterogéneo, que no fue triturado porque su textura era arcillosa. Esta propiedad pudo haberse convertido en un inconveniente, porque el cultivo de frijol se desarrolló en contenedores con un volumen limitado. De manera natural el Tecnosol tendería a compactarse, y las arcillas que contiene acelerarían este proceso (Wesley, 2014). No obstante, el residuo de excavación que empleamos tenía la propiedad de formar estructura en relativamente poco tiempo (al final del experimento se apreciaba al tacto, agregación moderada, particularmente en el tratamiento 2). Esta propiedad se vio favorecida en los tratamientos en los que se aplicó materia orgánica humificada (tratamiento 1, con composta-biocarbón; tratamiento 2 con lombricomposta). Por otra parte, la porosidad en los tratamientos 1 y 2 alcanzó valores de 69.1 y 67.3% respectivamente y fueron evaluadas como buenas, mientras que en el tratamiento 3, la porosidad fue mayor (74.2%), pero evaluada como media, porque el excesivo drenaje ocasiona un gasto mayor de agua. La densidad aparente fue evaluada buena en los dos primeros tratamientos (0.66-0.79 g cm<sup>-3</sup>) y media en el tratamiento 3 (0.54 g cm<sup>-3</sup>). La capacidad de retención de agua disponible fue evaluada regular en los tratamientos 1 y 3 (70 y 84 L m<sup>-2</sup>) y media en el tratamiento 2 (101.5 L m<sup>-2</sup>).

La conductividad eléctrica de los tres tratamientos está por debajo de niveles que pudieran influir en el crecimiento de las plantas de frijol, su calidad fue evaluada alta porque favorece el crecimiento de las plantas. La composta y la lombricomposta tienen pHs muy ligeramente ácidos (6.9 y 6.8 respectivamente), a diferencia el pH de la madera, único residuo que resultó moderadamente ácido (5.3). Las diferentes mezclas de los residuos generaron valores de pH que fluctuaron entre muy ligera (7.4) a fuertemente alcalino (8.6). Siendo los tratamientos 1 y 2 en los que se aplicó biocarbón, los que presentaron pHs más alcalinos (evaluados como regulares), y el tratamiento 2 menos alcalino (evaluado de calidad media). Podemos afirmar que el residuo más alcalinizante fue el biocarbón. El suelo artificial más alcalino (8.7) fue el tratamiento 3, que contenía residuos de excavación y biocarbón, ambos residuos alcalinos, y carecía de residuos orgánicos que pudieran aminorar esta alcalinidad.

La cantidad de nitrógeno total fue similar en los tratamientos 1 y 2 (1.7 y 1.8 kg m<sup>-2</sup>) y evaluada como buena (Siebe, *et al.*, 2016). En el tratamiento 3 la cantidad de nitrógeno total (0.9 kg m<sup>-2</sup>) fue evaluada como media (Siebe, *et al.*, 2016). La cantidad de carbono en el tratamiento 3 fue evaluada muy buena, en el tratamiento 1 buena y en el tratamiento 2 como regular. La relación C/N fue evaluada como buena en el tratamiento 2, regular en el tratamiento 1 y mala en el tratamiento 3. En lo que respecta al fósforo, al transformar los datos a unidades de volumen (kg m<sup>-2</sup>), el tratamiento 2 (con lombricomposta), resultó con la mayor cantidad (92.7 g m<sup>-2</sup>), que los tratamientos 1 y 3 (68.2 y 68.7 g m<sup>-2</sup> respectivamente), no obstante, los tres valores fueron evaluados como medios (Siebe *et al.*, 2016). En lo que respecta a la cantidad de bases intercambiables (incluyendo el sodio) en los tres tratamientos fluctúa entre 13.9 y 24.3 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> y fueron evaluadas como regulares (Siebe *et al.*, 2016).

De forma general las variables de crecimiento: altura, cobertura, diámetro, y de productividad: biomasa de semillas, y número de semillas, fueron evaluadas como buenas en el tratamiento 2, regulares en el tratamiento 1 y malas en el tratamiento 3. La biomasa total fue evaluada buena en los dos primeros tratamientos y regular en el tercero. La biomasa de vainas y semillas fue alta en el segundo tratamiento, media en el primero y baja en el tercero. En este grupo de Tecnosoles destaca el tratamiento 2, por haber obtenido las mejores calificaciones en cuando a la calidad del suelo, así como en el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol.

## 6.6.2 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de construcción, composta-biocarbón, lombricomposta y trozos de madera

Los tratamientos 4, y 5 tenían en común que contenían residuos de construcción, el primer tratamiento fue mezclado con composta y biocarbón (25% y 20% respectivamente), y el segundo con lombricomposta (45%). Los dos tratamientos contenían un 25% de trozos de madera.

Los residuos de construcción son cascajo triturado, con partículas de 2 a 5 mm aproximadamente y una densidad real media ( $2.5 \text{ g cm}^{-3}$ ). Al mezclarse con composta-biocarbón, lombricomposta y con trozos de madera se obtuvieron Tecnosoles con propiedades muy favorables. Sin embargo, aunque sus texturas se volvieron más finas, estos Tecnosoles no presentaron la cualidad de formar agregados a corto plazo, como fue evidente en los tratamientos en los que se emplearon residuos de excavación. No obstante, evitaron que el suelo se compactara manteniendo un espacio poroso importante lo cual favoreció el crecimiento y la aireación de las raíces, y contribuyó a evitar la compactación del suelo. La porosidad fue ligeramente mayor en el tratamiento en el que se aplicó lombricomposta (65.7%) que en el tratamiento en el que se aplicó composta y biocarbón (61.9%), y ambas fueron evaluadas buenas. Los residuos de construcción tienen densidades reales medias que, al mezclarse con otros residuos menos densos como la composta-biocarbón, la lombricomposta y los trozos de madera, resultaron en densidades aparentes que pudieron sostener adecuadamente a las plantas de frijol. La densidad aparente en ambos tratamientos fue  $0.79 \text{ g cm}^{-3}$ , y fue evaluada buena (Siebe *et al.*, 2016), permitiendo un buen desarrollo del sistema radical, incluyendo a las raíces finas. La capacidad de retención de agua disponible fue evaluada regular en ambos tratamientos ( $52.5$  y  $84 \text{ L m}^{-2}$ ).

Los tratamientos con residuos de construcción presentaron conductividades eléctricas con valores de  $1.17 \text{ mS cm}^{-1}$ , tratamiento 4 y  $1.11 \text{ mS cm}^{-1}$ , tratamiento 5. Ambos valores fueron evaluados buenos (Siebe *et al.*, 2016) porque no afectan el crecimiento de las plantas de frijol. Los residuos de construcción junto con el biocarbón son moderada a fuertemente alcalinos (8.4 y 8.8 respectivamente). La composta y la lombricomposta tienen pHs muy ligeramente ácidos (6.9 y 6.8

respectivamente), y la madera resultó moderadamente ácida (5.3). El tratamiento 4 (con composta-biocarbón) tuvo un pH moderadamente alcalino (8.4) y el tratamiento 5 fue ligeramente alcalino (con lombricomposta) (7.8) y fueron evaluados con calidad regular y media respectivamente. El tratamiento al que se le aplicó biocarbón presentó el pH más alcalino, por la acción alcalinizante de este residuo.

El tratamiento 4 contenía 25% de composta, mientras que el tratamiento 5 contenía casi el doble de volumen de lombricomposta (45%). Sin embargo, la cantidad de carbono y nitrógeno fue mayor en el tratamiento 4 (53, 2.8 kg m<sup>-2</sup>) que en el tratamiento 5 (23.1, 1.7 kg m<sup>-2</sup>). En el tratamiento 4 el C fue evaluado bueno y el N muy bueno. En el tratamiento 5 el C fue evaluado regular y el N bueno. En el tratamiento 4 la evaluación favorable se debe a que una parte importante del carbono está en forma de biocarbón relativamente estable en el tiempo. La relación C/N fue evaluada regular y buena en ambos tratamientos respectivamente. En el caso del fósforo, el tratamiento 5 (con lombricomposta), tuvo una mayor concentración (77.7 g m<sup>-2</sup>), que el tratamiento 4 (61.1 g m<sup>-2</sup>), ambos valores evaluados como muy buenos (Siebe *et al.*, 2016). En cuanto a las concentraciones totales (mg kg<sup>-1</sup>) de K, Ca, Mg, ambas compostas presentan una mayor concentración de K y Mg que el resto de los residuos. La concentración de K es similar en ambas compostas y la concentración de Ca y Mg es más alta en la composta de la Ciudad de México que en la lombricomposta, sobre todo en el primer nutrimento. No obstante, el aporte más importante de calcio proviene de los residuos de construcción. En lo que respecta a la cantidad de bases intercambiables (incluyendo el sodio), en los tres tratamientos fluctuó entre 17.8 y 20 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> y fueron evaluadas como regulares (Siebe *et al.*, 2016).

Todas las variables de crecimiento y productividad fueron evaluadas buenas en ambos tratamientos, con excepción del diámetro del tallo del tratamiento 4 que fue evaluado medio. Ambos tratamientos obtuvieron calificaciones muy buenas en cuando a calidad del suelo, así como en el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol.

### 6.6.3 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con trozos de madera, composta-biocarbón y lombricomposta

Los tratamientos 6, 7 tenían en común que carecían de residuos de excavación y construcción, el primer tratamiento fue mezclado con composta y biocarbón (25% y 20% respectivamente), y el segundo con lombricomposta (45%). Ambos tratamientos contenían un 55% de trozos de madera.

En ambos tratamientos el volumen que ocupaban los residuos de construcción y excavación fueron reemplazados por trozos de madera, de tal forma que eran los más orgánicos de todos los tratamientos (tenían el doble de trozos de madera). El tamaño de los trozos de madera era variable algunos eran pequeños (2-3 cm) y otros un poco más grandes (6-2 cm), al mezclarse con la composta-biocarbón y la lombricomposta se generó una textura gruesa con una alta permeabilidad. Por lo mismo sus densidades eran las más bajas de todos los tratamientos (0.5 y 0.53 g cm<sup>-3</sup>). Fueron evaluadas medias, porque si bien las plantas de frijol crecieron rápida y vigorosamente en ambos Tecnosoles, cuando las plantas desarrollaron sus frutos, el peso fue tan alto que algunas comenzaron a desestabilizarse, de tal forma que tuvieron que colocarse tutores para dar soporte y evitar que la planta se saliera del Tecnosol. En ambos tratamientos la porosidad fue similar (73.2 y 73.3% respectivamente), y evaluadas como medias. Los poros grandes ocasionaban que el agua drenara rápidamente, lo cual implicó un gasto extra de agua. Además, cuando las plantas alcanzaron su máximo desarrollo, los Tecnosoles no pudieron sostener adecuadamente a las plantas. La capacidad de retención de agua disponible fue evaluada regular (63 L m<sup>-2</sup>) y buena respectivamente (150.5 L m<sup>-2</sup>).

El pH fue moderadamente alcalino en el tratamiento 6 (con biocarbón y composta) y ligeramente alcalino en el tratamiento 7 (con lombricomposta). El primero fue evaluado regular y el segundo medio. El tratamiento al que se le aplicó biocarbón presentó el pH más alcalino, por la acción alcalinizante de este residuo. La conductividad eléctrica fue de 1.0 y 0.87 mS cm<sup>-1</sup>, la primera evaluada buena y la segunda como muy buena, porque no afectan el crecimiento de las plantas de frijol. La cantidad de C en el tratamiento 6 fue evaluada media y en el tratamiento 7 mala. El criterio para esta evaluación está relacionado con la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. A pesar de que el tratamiento con lombricomposta tenía el doble de

volumen que el tratamiento con composta, la cantidad de nitrógeno fue más alta en el tratamiento 6 (3.2 kg m<sup>-2</sup>), que en el tratamiento 7 (2.6 kg m<sup>-2</sup>), ambas evaluadas como muy buenas (Siebe, *et al.*, 2016). En ambos tratamientos las relaciones C/N fueron evaluadas medias. En lo que respecta al fósforo, la cantidad de fósforo fue similar en ambos tratamientos (64.7 y 65.7 g m<sup>-2</sup> respectivamente) y evaluadas con calidad media (Siebe *et al.*, 2016). En lo que respecta a la cantidad de bases intercambiables (incluyendo el sodio) en ambos tratamientos fue muy similar 15.6 y 15.7 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, evaluadas como regulares (Siebe *et al.*, 2016).

Todas las variables de crecimiento y productividad fueron evaluadas buenas en ambos tratamientos, con excepción de la altura del tratamiento 6 que fue evaluada media. El tratamiento 6 obtuvo mejores calificaciones en cuanto a la calidad del suelo, y el tratamiento 7 en cuanto al crecimiento y la productividad de las plantas de frijol, ambos son buenos Tecnosoles para el crecimiento de las plantas de frijol.

Cuadro 13. Evaluación de la calidad de los 7 Tecnosoles, y desempeño de las plantas de frijol.

Tratamientos	1	2	3	4	5	6	7	
Evaluación de las propiedades edáficas	PT (%)	69.1	67.3	74.2	61.9	65.7	73.2	73.3
	DA (g cm <sup>-3</sup> )	0.66	0.79	0.54	0.79	0.79	0.5	0.53
	pH	8.3	7.4	8.7	8.4	7.8	8.1	7.4
	CE (mS cm <sup>-1</sup> )	1.4	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	0.87
	CRAD (L m <sup>-2</sup> )	84	101.5	70	52.5	84	63	150.5
	C (kg m <sup>-2</sup> )	34.4	22.9	35.5	53	23.1	52.6	40.1
	N (kg m <sup>-2</sup> )	1.7	1.8	0.9	2.8	1.7	3.2	2.6
	C/N	20.4	12.5	39.9	19.2	13.2	16.5	15.3
	P (g m <sup>-2</sup> )	68.2	92.7	68.7	61.1	77.7	65.7	64.7
	BI (cmol m <sup>-2</sup> )	15.2	24.3	13.9	20.0	17.8	15.7	15.5
Desempeño de las plantas de frijol	Alt (cm)	31.4±0.04	41.0±0.02	20.3±0.03	43.6±0.02	39.7±0.03	38.4±0.03	47.6±0.02
	Cob (cm <sup>2</sup> )	1082.4±3.03	1513.2±1.96	510.8±2.56	1459.2±1.72	1689.2±2.43	1354.2±2.53	1814.8±1.9
	Dia (mm)	6.8±0.004	8.4±0.003	5.8±0.004	7.8±0.003	9.6±0.004	8.4±0.004	9.6±0.003
	BT (g)	13.7±0.05	18.5±0.05	3.6±0.06	13.7±0.06	18.5±0.05	14.4±0.06	19.4±0.06
	BVS (g)	13.0±0.02	16.8±0.02	11.0±0.03	17.6±0.02	15.2±0.02	16.8±0.03	17.6±0.03
	BS (g)	34.8±0.08	53.3±0.07	25±0.10	51.8±0.06	51.8±0.07	43.6±0.08	56.3±0.08
	Nº de vainas	44.9±0.07	56.3±0.06	41.0±0.08	57.8±0.06	50.4±0.06	62.4±0.07	57.8±0.07
	Nº de nódulos	10.4	59.2	18.8	11.7	26.8	36.8	93.75

Evaluación de la propiedades edáficas y rasgos de las plantas de frijol

Muy buena Buena Media Regular Mala

Donde: Porosidad total (PT); Densidad aparente (DA); Conductividad Eléctrica (CE); Capacidad de retención de agua disponible (CRAD); Bases intercambiables (BI); Altura (Alt); Cobertura (Cob); Diámetro (Dia); Biomasa de vainas y semillas (BVS); Biomasa de semillas (BS); ± Error estándar.

## 6.5 Análisis de Rasgos funcionales

### 6.5.1 Rasgos funcionales de hojas

De los análisis de varianza realizados con los datos de rasgos funcionales de hojas, no se obtuvieron diferencias significativas en el contenido foliar de masa seca (CFMS). En los análisis de rasgos funcionales restantes, se encontraron diferencias significativas de los valores alcanzados por las plantas entre los tratamientos.

#### 7.5.1.1 Espesor de la hoja (Esp)

En este rasgo funcional no fue necesario realizar una transformación de los datos, pues se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad para el ANOVA, obteniendo así valores  $P$  de 0.241 y 0.722 respectivamente. El ANOVA reveló que existían diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 14). La prueba de Tukey mostró que el tratamiento 3 fue diferente a los tratamientos 1, 4, 5, 6 y 7, mientras que el tratamiento 2 compartió similitudes con los dos grupos que se encontraron.

En la Figura 14 se muestran los valores obtenidos por bloque, el valor promedio y error estándar por tratamiento. Se observa que el tratamiento que alcanzó los valores más altos para este rasgo fue el tratamiento 3, mismo que presentó diferencias significativas entre los demás tratamientos (a excepción del tratamiento 2). En contraste, los tratamientos 1 y 7 tuvieron los valores más bajos, sin embargo, estos tratamientos no presentaron diferencias significativas con los tratamientos 4, 5 y 6. En cuanto al comportamiento de los bloques incluidos por cada tratamiento, fue muy variado pues solamente el bloque 3 de los tratamientos 1 y 6 tuvo los valores más altos. El bloque 2 presentó los valores más altos en los tratamientos 2 y 7; mientras que en el bloque 1 los tratamientos 4 y 5 fueron los que presentaron los valores más altos.

Cuadro 14. ANOVA y prueba de Tukey realizado con los valores del rasgo funcional Espesor de la hoja (Esp).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	0.001	6.374	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	<0.000	0.052	0.983
Residuales	18	<0.000	-	-
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	de Grupos
1	0.3	0.006	18	a
2	0.4	0.006	18	ab
3	0.4	0.006	18	b
4	0.3	0.006	18	a
5	0.3	0.006	18	a
6	0.3	0.006	18	a
7	0.3	0.006	18	a

Las probabilidades significativas, se muestran en negritas.

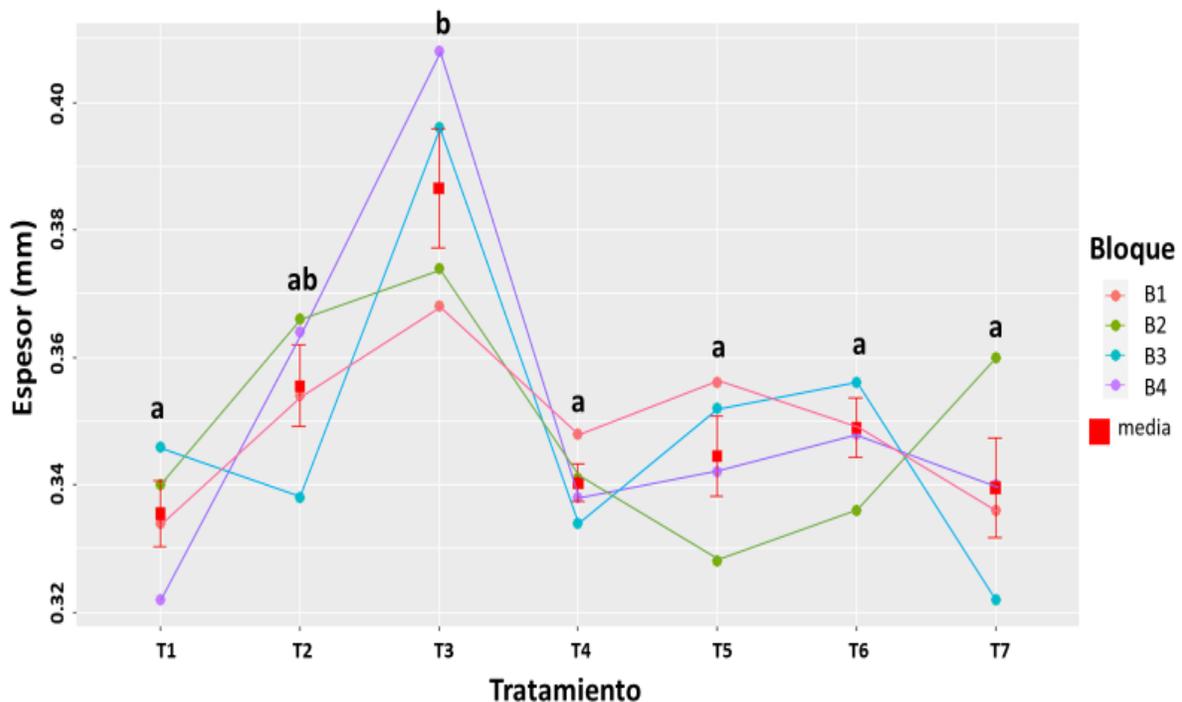


Figura 14. Modelo obtenido para el rasgo funcional espesor de la de hoja. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 7.5.1.3 Área foliar específica (AFE)

El análisis de varianza realizado con los valores transformados con raíz cuadrada del área foliar específica mostró que existían diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 15). La prueba de Tukey arrojó tres diferentes grupos (Cuadro 15), de los cuales el primero estuvo conformado por los tratamientos 6 y 7, estos tuvieron los valores más altos para esta variable, en un segundo grupo estuvieron los tratamientos 1, 3 y 5 con los valores más bajos de área foliar específica. Finalmente, en el tercer grupo, se encontraron los tratamientos 2 y 4 que tuvieron los valores medios y que compartieron similitudes con los dos grupos mencionados anteriormente.

Cuadro 15. ANOVA y prueba de Tukey realizado con los datos del rasgo funcional área foliar específica (AFE).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	4.25	5.54	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	6.07	7.97	<b>&lt;0.001</b>
Residuales	18	0.77	-	-
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	14.8	0.438	18	a
2	16.2	0.438	18	ab
3	15.1	0.438	18	a
4	15.7	0.438	18	ab
5	14.8	0.438	18	a
6	17.2	0.438	18	b
7	17.2	0.438	18	b

*Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.*

En la Figura 15 se pudo observar que los tratamientos con los valores promedio más altos para este rasgo, se presentaron en los tratamientos 6 y 7, mismos que no presentaron diferencias significativas con los tratamientos 2 y 4. En contraste, los tratamientos con los valores más bajos fueron los tratamientos 1 y 5, mismos que tuvieron gran similitud con el tratamiento 3. En cuanto a los bloques, en el bloque 2

se presentaron los valores más altos tanto en el tratamiento 2 (el más alto de todos los tratamientos), como en los tratamientos 3, 4, 6 y 7. En los tratamientos restantes el bloque 1 tuvo los valores más altos. Los valores más bajos recayeron en el bloque 3.

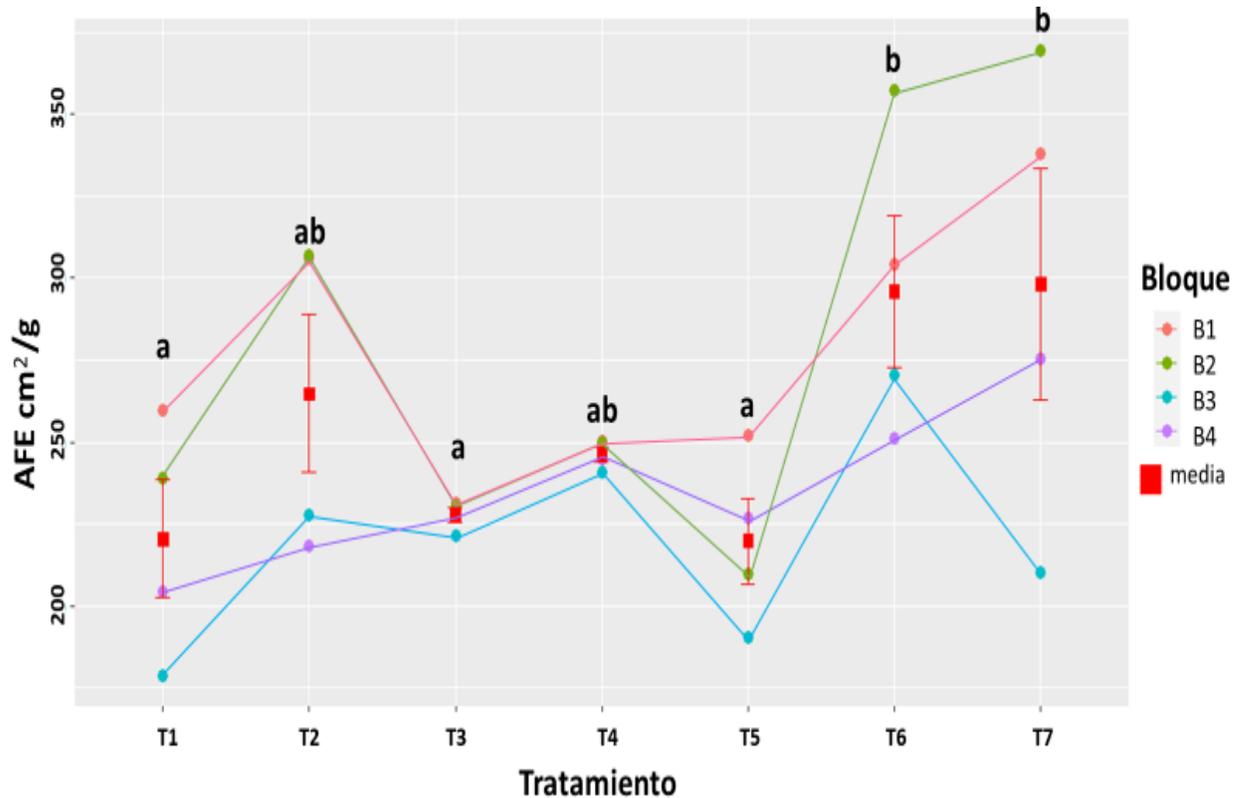


Figura 15. Modelo obtenido para el rasgo funcional AFE. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.5.1.3 Densidad del tejido foliar (DTF)

Al realizar el ANOVA a los datos transformados con raíz cuadrada de densidad del tejido foliar, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, aunque el nivel de significancia no fue tan fuerte como en los rasgos anteriores (Cuadro 16). En la prueba de Tukey se obtuvieron 3 grupos homogéneos (Cuadro 16). Se puede ver que el primer grupo estuvo constituido por el tratamiento 7, el cual obtuvo los valores más bajos para la densidad del tejido foliar. Por otro lado, el segundo grupo englobó sólo al tratamiento 5, el cual tuvo el valor más bajo para este rasgo. En un

tercer grupo se encontraron los tratamientos 1, 2, 3, 4, y 6 en donde se tuvieron valores medios y compartieron similitudes con los dos primeros grupos.

Cuadro 16. ANOVA y prueba de Tukey realizado a los datos del rasgo funcional densidad del tejido foliar (DTF).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	<0.00	2.95	<b>0.034</b>
Bloque	3	<0.00	2.11	0.135
Residuales	18	<0.00	-	
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	de Grupos
1	0.12	0.004	18	ab
2	0.11	0.004	18	ab
3	0.11	0.004	18	ab
4	0.12	0.004	18	ab
5	0.12	0.004	18	b
6	0.11	0.004	18	ab
7	0.10	0.004	18	a

*Las probabilidades significativas, se muestran en negritas.*

En la Figura 16 se pueden observar los resultados obtenidos para este rasgo con los datos sin transformar, los cuales son congruentes con los valores obtenidos en el rasgo espesor de hojas. Los tratamientos 2 y 7 tuvieron los valores promedio más bajos, mismos que no presentaron diferencias significativas entre los demás tratamientos a excepción del tratamiento 5, el cual presentó los valores más altos de densidad de tejido foliar. En cuanto al comportamiento que presentaron los bloques, en los tratamientos 1, 2, 4 y 7, el bloque con los valores más altos fue el 3, mientras que, en los tratamientos restantes, el valor máximo varió entre el bloque 4 (tratamiento 6), el bloque 1 (tratamiento 5) y el bloque 2 (tratamiento 3). En cuanto a los valores mínimos, estos se presentaron con mayor frecuencia en el bloque 2.

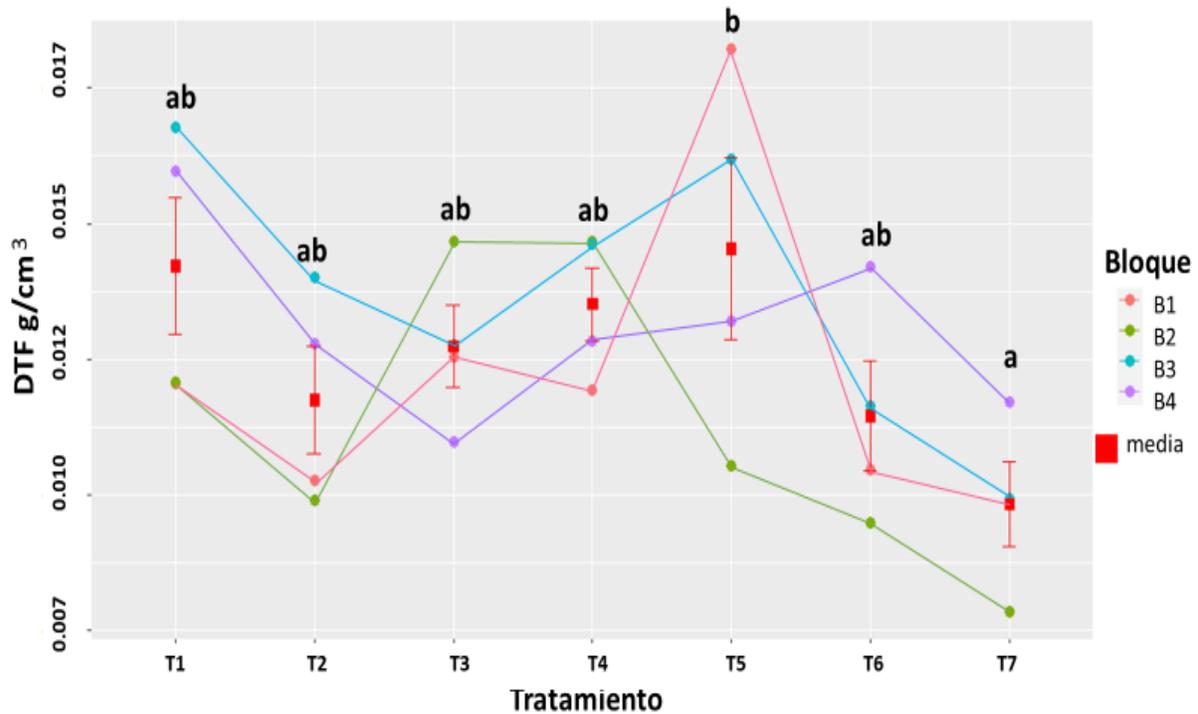


Figura 16. Modelo obtenido para el rasgo funcional DTF. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.5.2 Rasgos funcionales de raíces

Se realizaron análisis de varianza para los siguientes 4 rasgos funcionales de raíces, densidad del tejido radical (DTR), longitud radical específica (LRE), contenido radical de masa seca (CRMS) y área superficial específica (ASE). En todos los casos se encontró que existían diferencias significativas entre los tratamientos. Posteriormente, se realizó la prueba de Tukey para identificar los grupos homogéneos. En todas las variables se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con valores de  $P < 0.05$ .

#### 6.5.2.1 Densidad del tejido radical (DTR)

En este rasgo se pudieron comprobar los supuestos de normalidad y homocedasticidad sin transformar los datos. En el ANOVA realizado se encontraron diferencias significativas relevantes entre los tratamientos (Cuadro 17). En la prueba

de Tukey, se identificaron 3 grupos homogéneos (Cuadro 17), el primero grupo (a) incluyó a los tratamientos 1, 2, 3, 4, y 7 los cuales tuvieron los valores más bajos de DTR. El grupo “b” sólo incluyó al tratamiento 5, el cual tuvo el valor promedio más alto. El tercer grupo sólo tuvo al tratamiento 6 el cual compartió similitud con los dos grupos antes mencionados.

En la Figura 17 se puede observar de manera más detallada los valores obtenidos por bloque, así como los valores promedio y error estándar obtenidos para cada tratamiento. En la Figura 17 se corrobora que el tratamiento 5 tuvo el valor promedio más alto, además de obtener los valores máximos en tres de los cuatro bloques. También se muestra el comportamiento de los tratamientos donde no hubo diferencias significativas pues sus valores promedio no variaron entre sí. El bloque 3 presentó los valores más altos en los tratamientos 2, 5 y 7, mientras que el bloque 2 tuvo los valores más bajos en los tratamientos 4, 6 y 7.

Cuadro 17. ANOVA y prueba de Tukey realizado con los datos del rasgo funcional densidad del tejido radical (DTR).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	0.027	5.299	<b>0.003</b>
Bloque	3	0.007	1.379	0.281
Residuales	18	0.005	-	-
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error Estándar	Grados libertad	de Grupos
1	0.10	0.036	18	a
2	0.11	0.036	18	a
3	0.07	0.036	18	a
4	0.10	0.036	18	a
5	0.32	0.036	18	b
6	0.15	0.036	18	ab
7	0.11	0.036	18	a

*Las probabilidades significativas se muestran en negritas.*

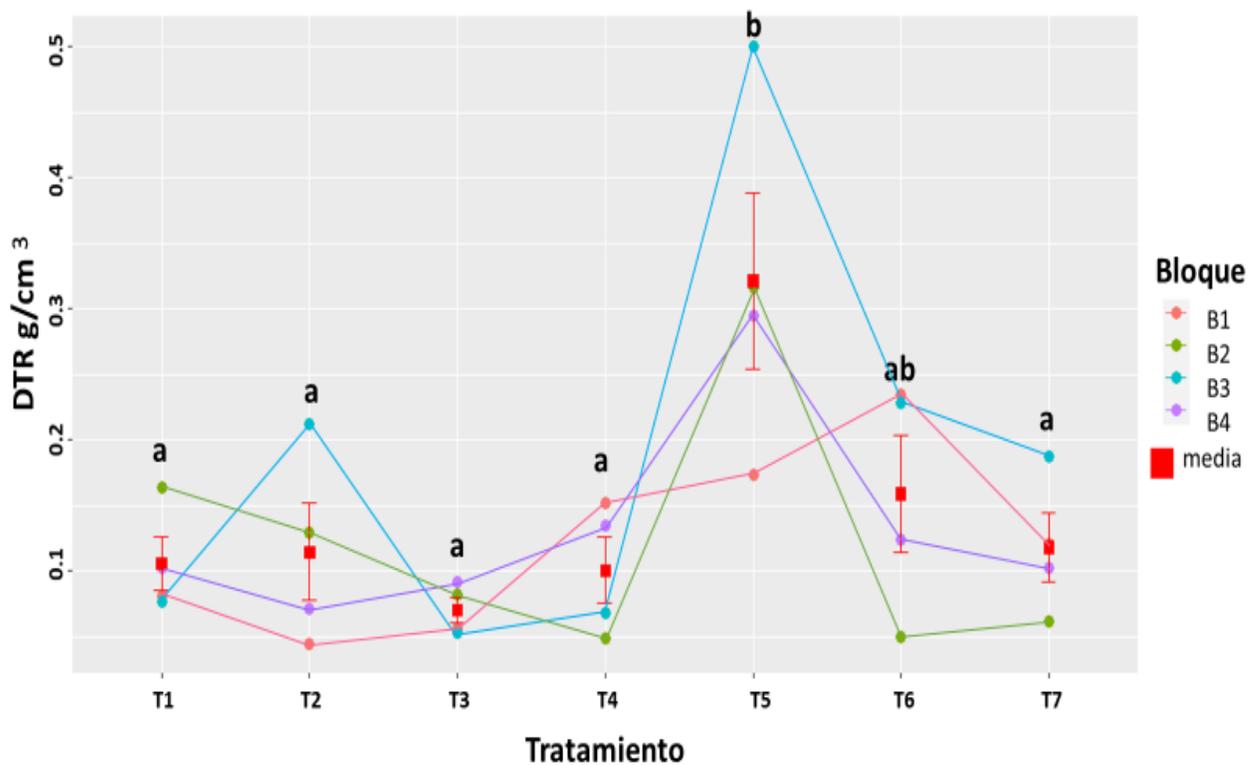


Figura 17. Modelo obtenido para el rasgo funcional DTR. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.5.2.2 Longitud radical específica (LRE)

Los resultados del ANOVA mostraron la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 18). La prueba de Tukey arrojó la existencia de 3 grupos homogéneos (Cuadro 18). El primer grupo incluyó a los tratamientos 1, 2, 5, 6 y 7 con los valores más bajos de longitud radical específica, el siguiente grupo abarcó únicamente al tratamiento 3 con el valor promedio más alto para este rasgo. Finalmente, el tercer grupo estuvo conformado por el tratamiento 4, el cual compartió similitudes con los grupos antes mencionados.

Cuadro 18. ANOVA y prueba de Tukey realizada con los datos del rasgo funcional longitud radical específica (LRE).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	7325	5.467	<b>0.002</b>
Bloque	3	1160	0.866	0.476
Residuales	18	1340	-	-

Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	de Grupos
1	59.5	18.30	18	a
2	46.7	18.30	18	a
3	160.5	18.30	18	b
4	95.9	18.30	18	ab
5	32.5	18.30	18	a
6	56.1	18.30	18	a
7	68.8	18.30	18	a

*Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.*

En la Figura 18 se observa de manera más detallada el comportamiento de bloques y tratamientos para este rasgo. Se corrobora que el tratamiento 3 presentó el valor promedio más alto, así como los valores máximos de 3 de los bloques (con excepción del bloque 2). En contraste, el tratamiento 5 tuvo el valor promedio más bajo, sin embargo, éste no presentó diferencias significativas con los tratamientos 1, 2, 4, 6 y 7. En cuanto a los valores mínimos que se presentaron por bloques, variaron según el tratamiento, mientras que para los tratamientos 4 y 6 dichos valores fueron del bloque 1, en el caso de los tratamientos 2 y 5 fue en el bloque 3.

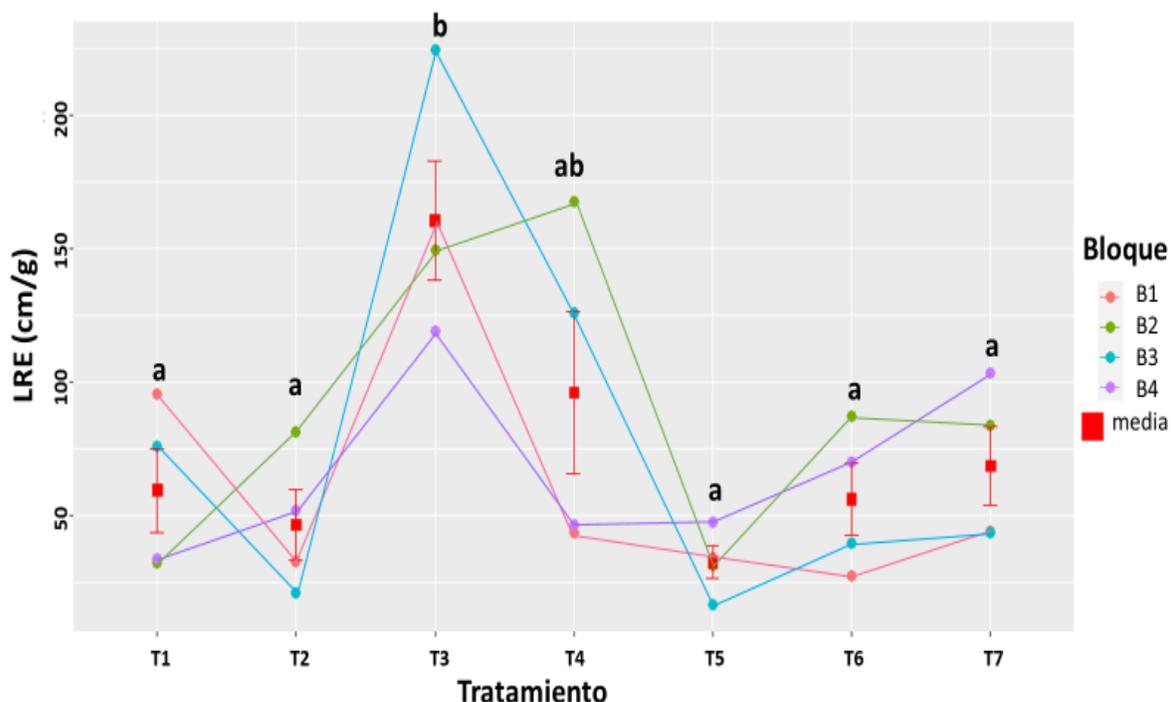


Figura 18. Modelo obtenido para el rasgo funcional LRE. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.5.2.3 Contenido radical de masa seca (CRMS)

El ANOVA de contenido radical de masa seca (Cuadro 19) mostró que existían diferencias significativas entre tratamientos. La prueba de Tukey, nos indicó la existencia de 2 grupos homogéneos (Cuadro 19). El primer grupo, estuvo conformado por los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5 y 7, en todos los casos se tuvieron valores bajos a diferencia del tratamiento 6 que obtuvo los valores más altos para el contenido radical de masa seca, por ello formó parte de un grupo diferente.

En la Figura 19 se ve con mayor detalle lo antes explicado ya que la diferencia entre el valor promedio del tratamiento 6 es considerable con respecto a los otros seis tratamientos. Lo mismo sucedió con el valor obtenido por bloque puesto que los valores más altos se presentaron en el tratamiento 6, siendo el bloque 3 el que presentó los valores máximos en tres de los tratamientos. Estos valores se comportaron de manera opuesta a los obtenidos en el rasgo aéreo contenido foliar de masa seca (CFMS).

Cuadro 19. ANOVA y prueba de Tukey realizados con los datos del rasgo funcional contenido radical de masa seca (CRMS).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	0.052	37.19	<b>&lt;0.001</b>
Bloque	3	0.001	1.01	0.410
Residuales	18	0.001	-	-
Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	0.20	0.018	18	a
2	0.19	0.018	18	a
3	0.15	0.018	18	a
4	0.19	0.018	18	a
5	0.20	0.018	18	a
6	0.49	0.018	18	b
7	0.19	0.018	18	a

Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.

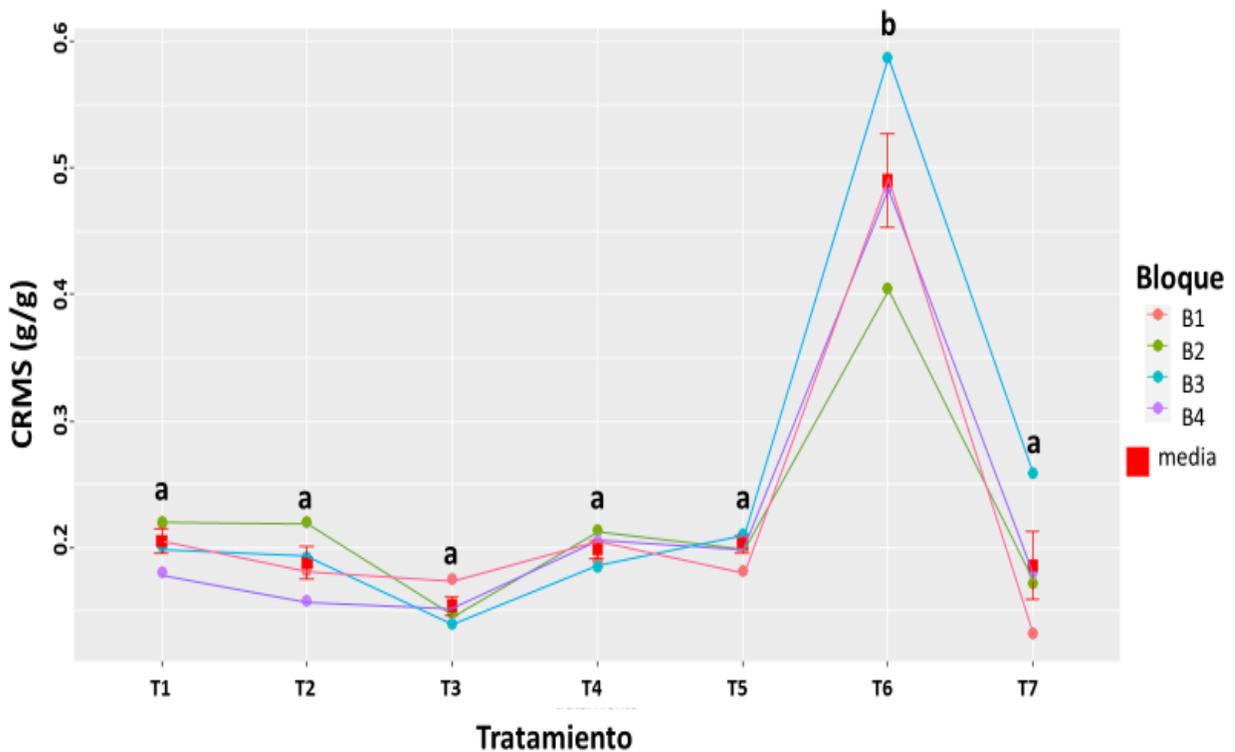


Figura 19. Modelo obtenido para el rasgo funcional CRMS. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

#### 6.5.2.4 Área superficial específica (ASE)

El ANOVA dio como resultado diferencias significativas entre tratamientos, aunque éstas no fueron tan altas como en rasgos anteriormente descritos. (Cuadro 20). En la prueba de Tukey, se observa la existencia de 3 grupos homogéneos (Cuadro 20). El primer grupo se conformó únicamente por el tratamiento 5, el cual tuvo los valores más bajos de área superficial específica. El segundo grupo estuvo conformado por el tratamiento 3 con el valor promedio más alto. El último grupo se compuso por los tratamientos 1, 2, 4, 6 y 7, los cuales compartieron similitudes con los dos grupos antes mencionados.

Cuadro 20. ANOVA y prueba de Tukey realizadas con los datos del rasgo funcional área superficial específica (ASE).

Fuente	Grados de libertad	Media cuadrática	Valor F	P
Tratamiento	6	690888	3.41	<b>0.019</b>
Bloque	3	166853	0.82	0.497
Residuales	18	202248	-	-

Tratamiento	Medias de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	Grupos
1	886	225	18	ab
2	950	225	18	ab
3	1739	225	18	b
4	1247	225	18	ab
5	379	225	18	a
6	849	225	18	ab
7	933	225	18	ab

*Las probabilidades significativas, se muestran en negritas.*

En la Figura 20 se puede observar con más detalle el comportamiento que tuvo el área superficial específica en cada tratamiento. Son evidentes las diferencias que existieron entre el tratamiento 3 y los tratamientos restantes pues fue el tratamiento 3 el que tuvo los valores más altos. Se puede ver también que los valores más altos obtenidos por bloque se presentaron en el tratamiento 3, seguidos por los

tratamientos 4, 6 y 7 en donde el bloque 2 tuvo valores altos. El comportamiento de los bloques en los demás tratamientos fue más variado, sin embargo, el bloque 1 fue el que presentó los valores más altos.

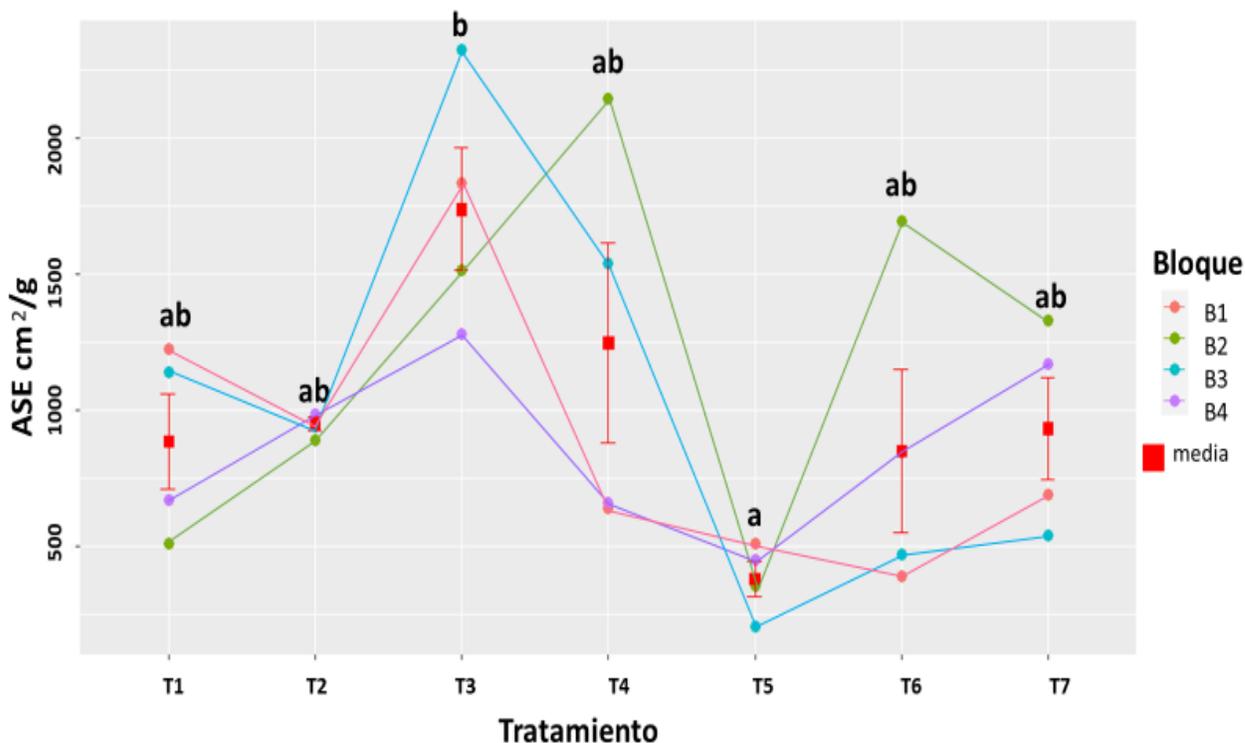


Figura 20. Modelo obtenido para el rasgo funcional área superficial específica. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento. Los grupos homogéneos se representan con letras minúsculas a, b, c y d.

### 6.5.3 Análisis de Componentes Principales de Rasgos Funcionales

Para el caso del ACP de los 8 rasgos funcionales calculados, se obtuvo que los dos primeros componentes principales lograron explicar el 61% de la variación de los datos, sin embargo, al añadir un tercer componente se alcanzó a explicar el 76% de la variación de los datos (Cuadro 21). En el CP1 las variables radiculares destacaron pues la longitud radical específica (LRE) y área superficial específica (ASE), covariaron fuertemente de manera positiva entre sí, mientras que la densidad del tejido radical (DTR) covarió de forma negativa en este componente (Cuadro 21; Figura 21).

En el componente dos (CP2) tomaron mayor peso las variables foliares área foliar específica y densidad del tejido foliar, las cuales covariaron de manera opuesta. Desde el punto de vista del espectro económico de hojas, tendríamos que, a medida que los valores de área foliar específica aumentan, las hojas de esos tratamientos tienen una mayor superficie y crecimiento por unidad de inversión, por ello los valores de densidad del tejido foliar tienden a ser menores. En el caso del componente 3 (CP3) los rasgos que destacaron fueron foliares (espesor de la hoja y contenido foliar de masa seca) y estos covariaron de manera positiva.

Cuadro 21. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre rasgos funcionales.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	1.72	1.38	1.08
Proporción de varianza explicada	37.2%	23.8%	14.6%
Proporción acumulada	37.2%	61%	76%

Cuadro 22. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales, de los 11 rasgos funcionales de *Phaseolus vulgaris* L.

	CP1	CP2	CP3
Espesor de la hoja	0.29	0.05	<b>0.83</b>
AFE	0.16	<b>0.89</b>	-0.10
CFMS	0.03	-0.13	<b>0.87</b>
DTF	-0.04	<b>-0.87</b>	-0.06
DTR	<b>-0.85</b>	-0.21	0.00
LRE	<b>0.86</b>	-0.11	0.32
CRMS	-0.37	0.45	-0.13
ASE	<b>0.95</b>	-0.01	0.13

Donde: área foliar específica (AFE); contenido foliar de masa seca (CFMS); densidad del tejido foliar (DTF); densidad del tejido radical (DTR); longitud radical específica (LRE); contenido radical de masa seca (CRMS) y área superficial específica (ASE).

Los valores representativos se encuentran en negritas.

En las Figuras 21 y 22 se muestra a detalle lo antes explicado, así como la distribución de los tratamientos en función del componente 1 y 2 y del componente 1 y 3. Se puede sustentar la existencia de un espectro económico tanto en la parte área como en la superficial por el acomodo de las cargas en cada componente. Los resultados obtenidos fueron muy claros pues en el CP1 se reflejaron rasgos de raíces mientras que, en el CP2, tomaron importancia rasgos foliares. En la Figura 21 se observa que las variables de raíz ASE y LRE (rasgos representativos pues indican el desarrollo de las plantas en términos de superficie y longitud por unidad de inversión, lo que refleja estrategias de tipo adquisitivas) tuvieron una relación positiva entre ellas mientras que, su relación con la densidad de tejido radical (los valores de este rasgo al ser altos por su alto contenido de carbono se asocian con estrategias conservativas) fue negativa. En el caso del CP2, se obtuvieron patrones similares pues en el cuadrante positivo se agrupó el área foliar específica (cuando los valores de este rasgo son altos, denota estrategias de tipo adquisitivo) mientras que en el cuadrante negativo el vector sobresaliente fue el de densidad de tejido foliar (cuando los valores de este rasgo son altos, denota estrategias de tipo conservativo). Se puede identificar entonces que los cuadrantes positivos se asocian con un manejo adquisitivo, mientras que los cuadrantes negativos están asociados a un manejo conservativo.

En el caso de la Figura 22 donde se graficó el CP1 vs el CP3, los patrones de covariación se respetaron, sin embargo, en este caso los rasgos funcionales que tuvieron mayor peso fueron diferentes para el CP3, estos también dan información valiosa del comportamiento de las plantas, lo cual es importante en este estudio pues se asocian con el tipo de Tecnosol utilizado. En el CP1 se vieron rasgos funcionales radiculares comportándose de la misma forma que en la Figura 22, pero en el CP3 fue donde se observó que únicamente tuvieron peso los vectores en el cuadrante positivo, en éste se encontraron los rasgos funcionales de hojas, contenido foliar de masa seca y espesor de la hoja, los cuales se asocian con estrategias de tipo conservativas.

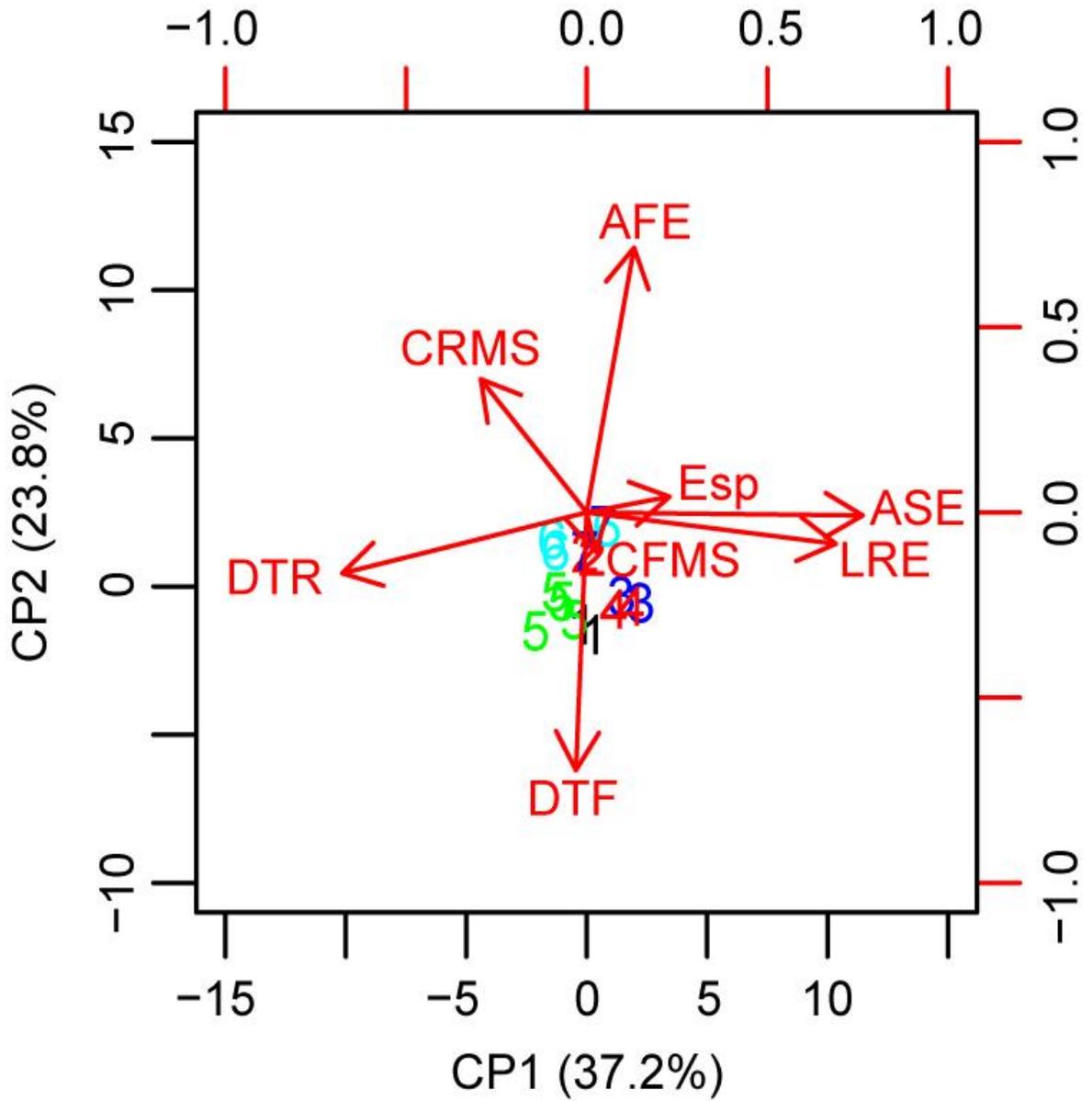


Figura 21. Representación gráfica del análisis de componentes principales de 8 rasgos funcionales de hojas y raíces. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.

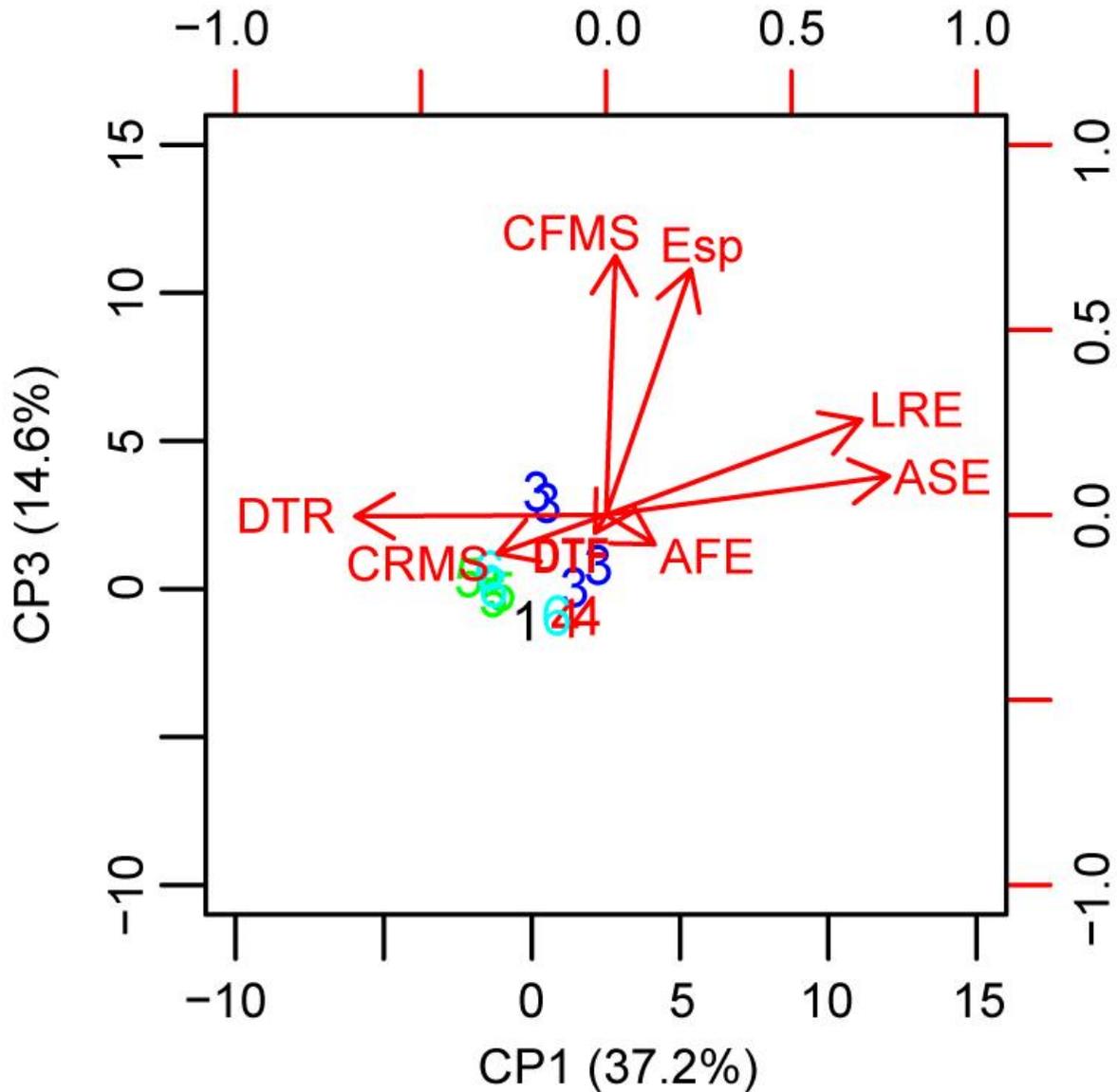


Figura 22. Representación gráfica del análisis de componentes principales de 8 rasgos funcionales de hojas y raíces. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP3.

#### 6.5.4 Análisis de Componentes Principales de Rasgos funcionales y propiedades físicas y químicas de suelo

En este caso se puede observar que los valores obtenidos del ACP (Cuadro 23), muestran una variación acumulada entre el componente 1 y 2 igual a 56.1% y al integrar un tercer componente, la variación acumulada se eleva a 70.1%. Resultaron covariaciones fuertes entre variables tanto de suelo como de rasgos funcionales, lo cual sustenta la hipótesis planteada acerca de la existencia de relaciones entre la

expresión de rasgos funcionales y las características físicas y químicas de los Tecnosoles. En el CP1 se relacionaron de manera positiva el espesor de la hoja, contenido foliar de masa seca, longitud radical específica, porosidad total, pH y la relación C/N, estos rasgos covariaron de manera opuesta con la densidad del tejido radical, el N y el Ca.

De igual manera, en el CP2 tomaron relevancia las variables tanto de rasgos funcionales como de suelo, aunque las que tuvieron mayor peso fueron las edáficas. Covariaron de manera positiva las variables densidad real, conductividad eléctrica y P, mientras que el contenido radical de materia seca, el C y N, covariaron de manera negativa.

Para el componente tres (CP3), la densidad de tejido foliar, la densidad aparente, el pH y K covariaron de forma positiva, mientras que el área foliar específica junto con la porosidad total, el Mg y la capacidad de retención de agua disponible, covariaron en sentido contrario como se muestra en el cuadro 24.

En la Figura 23 se observa a detalle lo antes explicado pues se puede ver la distribución que tuvieron los 7 tratamientos, así como los rasgos funcionales y las variables que fueron medidas en los suelos. En la Figura 23 se observa que se conserva la covariación positiva entre los rasgos ASE y LRE, en este caso es importante resaltar que la porosidad total del suelo también covarió en este sentido, lo cual implica mayor espacio poroso por donde las raíces pueden desplazarse. La relación C/N también representó un vector importante, esto pudo deberse en gran medida a la composición de los Tecnosoles pues se relacionó con algunos valores de los tratamientos 1 y 3 (compuesto de 45% biocarbón), considerados tratamientos de mala calidad por los resultados aéreos obtenidos, sin embargo, en la superficie su comportamiento se inclinó hacia estrategias de tipo adquisitivo. De manera opuesta, obtuvimos que, en el cuadrante negativo, los vectores densidad del tejido radical, N y Ca tuvieron mayor peso, aquí se ubicaron valores de los tratamientos 5 y 7 que a pesar de obtener resultados favorecedores en rasgos foliares inclinándose a estrategias de tipo adquisitivas, sus raíces tuvieron un comportamiento opuesto pues los valores de densidad de tejido radical fueron altos lo cual implica un manejo de recursos de tipo conservativo.

Cuadro 23. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales para rasgos funcionales y propiedades físicas y químicas del suelo.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	2.3	2.41	1.71
Proporción de varianza explicada	28.1%	28%	14%
Proporción acumulada	28.1%	56.1%	70.1%

En el caso del componente dos, no tomaron relevancia los vectores de rasgos funcionales en el cuadrante positivo, en este caso sólo la densidad real, conductividad eléctrica y P covariaron de manera positiva. En el cuadrante negativo se localizó el contenido radical de masa seca, identificado como un rasgo de tipo conservativo. En este mismo cuadrante se encontraron los vectores de suelo C y N junto con algunos valores de los tratamientos 6 y 7 que obtuvieron resultados favorecedores en la parte foliar, pero en la superficie su desarrollo fue más austero. Es importante resaltar que particularmente este análisis de componentes principales nos muestra que no existió un paralelismo entre rasgos foliares y radicales, estos últimos pudieron obedecer a las condiciones en los Tecnosoles como lo fueron la densidad aparente o real, la porosidad o el pH.

Cuadro 24. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales que incluye rasgos funcionales y propiedades físicas y químicas del suelo.

	CP1	CP2	CP3
Espesor de la hoja	<b>0.70</b>	0.29	0.03
AFE	-0.01	-0.28	<b>-0.62</b>
CFMS	<b>0.59</b>	0.20	0.05
DTF	-0.08	0.12	<b>0.68</b>
DTR	<b>-0.58</b>	0.11	0.09
LRE	<b>0.80</b>	-0.08	0.21
CRMS	-0.18	<b>-0.65</b>	-0.21
ASE	<b>0.72</b>	-0.06	0.14
Densidad aparente	-0.58	0.47	<b>0.58</b>
Densidad real	-0.29	<b>0.92</b>	0.24
Porosidad total	<b>0.60</b>	-0.12	<b>-0.69</b>
pH	<b>0.62</b>	-0.33	<b>0.65</b>
Conductividad eléctrica	0.20	<b>0.60</b>	0.38
C	0.15	<b>-0.95</b>	0.07
N	<b>-0.50</b>	<b>-0.76</b>	-0.25
P	-0.27	<b>0.83</b>	-0.11
K	0.40	0.24	<b>0.65</b>
Ca	<b>-0.80</b>	0.27	0.35
Mg	-0.18	-0.43	<b>-0.68</b>
Radio C/N	<b>0.92</b>	0.02	0.29
CRAD	-0.16	0.31	<b>-0.79</b>

Donde: área foliar específica (AFE); contenido foliar de materia seca (CFMS); densidad del tejido foliar (DTF); densidad del tejido radical (DTR); longitud radical específica (LRE); contenido radical de materia seca (CRMS); área superficial específica (ASE); capacidad de retención de agua disponible (CRAD).

*Los valores representativos se encuentran en negritas.*

El contraste entre el CP1 vs el CP3 (Figura 24), reforzó lo obtenido en el ACP anterior pues en el cuadrante positivo del CP3 destaco el vector densidad del tejido foliar junto con los vectores densidad aparente y pH. En el cuadrante opuesto se situaron los vectores área foliar específica que se caracteriza por manejar los recursos de manera adquisitiva cuando sus valores son altos, junto con los vectores Mg, porosidad total y cantidad de retención de agua disponible, lo cual concuerda con que se hayan situado en este cuadrante algunos datos de los tratamientos 6 y 7, con resultados favorecedores en la parte aérea.

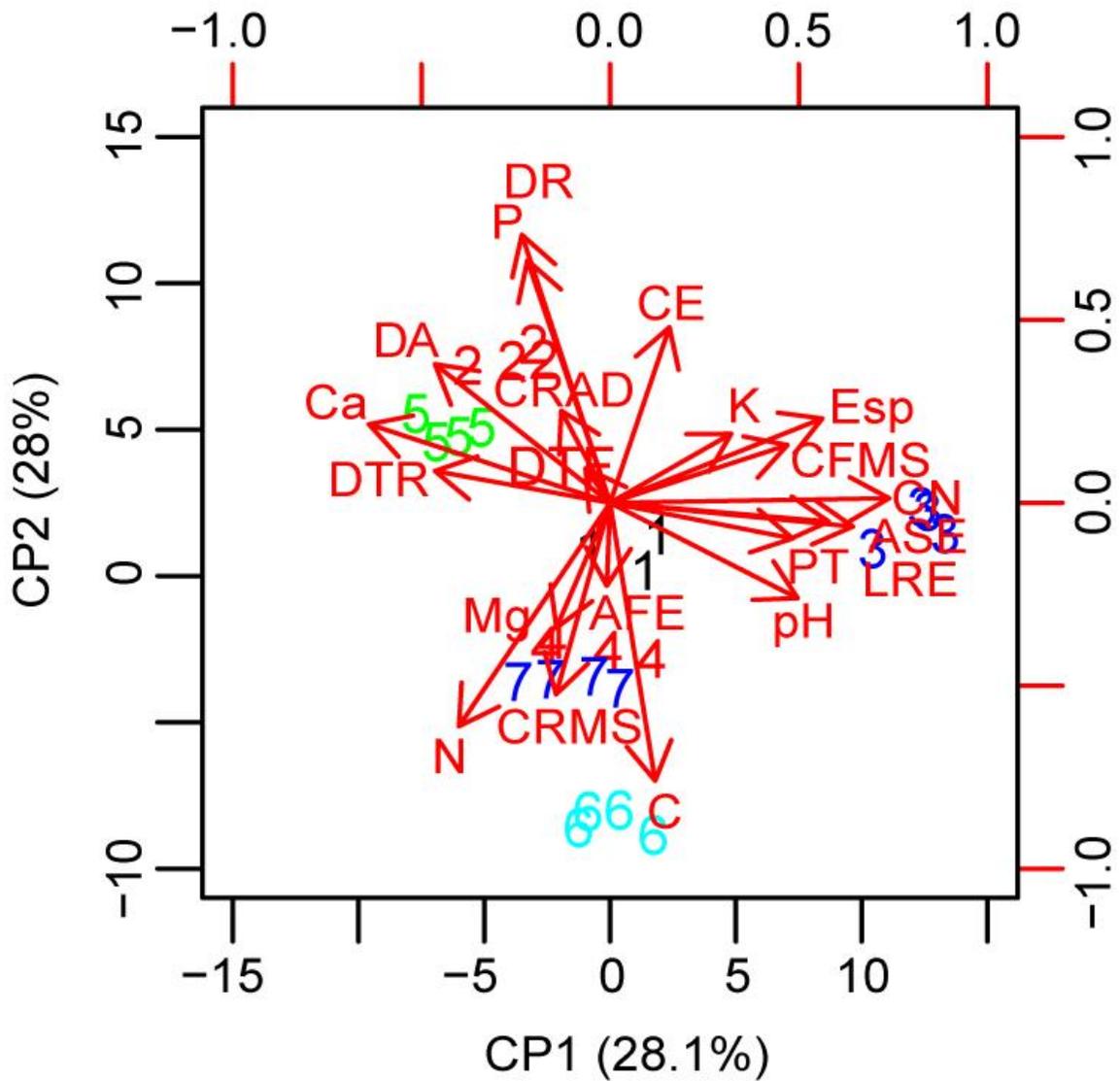


Figura 23. Representación gráfica del análisis de componentes principales de 8 rasgos funcionales y de las variables físicas y químicas de los Tecnosoles. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.



## VII. Discusión

### 7.1 Suelos artificiales recomendados para su uso en azoteas o áreas verdes rehabilitadas

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, determinamos que los siete tratamientos propuestos son aptos para el crecimiento y la productividad de frijol; sin embargo, algunos de ellos fueron más favorables que otros. Esto se vio reflejado en los rasgos funcionales aéreos y subterráneos, asociados a las diferentes condiciones físicas y químicas de los Tecnosoles. En esta sección, se discuten los resultados obtenidos en cuanto al crecimiento y la productividad del frijol con respecto a las variables edáficas medidas, con la intención de identificar a los tratamientos más propicios y las posibles variables que están interviniendo en este proceso.

En general los 7 tratamientos cumplieron con las funciones necesarias para el cultivo de plantas de frijol, como dar soporte y aportar nutrimentos, aire y agua disponible. No obstante, las variables más relevantes que están relacionadas con el crecimiento (altura, diámetro y cobertura) y la productividad (biomasa total, y biomasa de vainas y semillas y número de vainas), muestran que los tratamientos con el mejor desempeño fueron el 2 (con residuos de excavación), el 5 (con residuos de construcción), el 7, el 6 (sin residuos de construcción ni excavación), y el 4 (con residuos de construcción), los tres primeros tienen como residuo en común lombricomposta (45%) y los dos últimos contienen composta (25%) y biocarbón (20%). En todas las variables de crecimiento y productividad, el tratamiento 3 mostró los valores más bajos, y el tratamiento 1 valores intermedios.

De forma general los tratamientos en los que se aplicó lombricomposta (tratamientos 2, 5 y 7) tuvieron un mejor desempeño que los tratamientos en los que se aplicó composta-biocarbón (tratamientos 1, 3 y 6), independientemente de los residuos inorgánicos con los que se haya mezclado. Como se esperaba, la aplicación de compostas proporcionó múltiples beneficios a los suelos. Las compostas incrementaron la cantidad de materia orgánica humificada en el suelo, que a su vez se relacionó positivamente con variables edáficas como la formación

de estructura, la porosidad, la densidad aparente, la concentración de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua disponible. Cuando se comparó la composta y la lombricomposta, las diferencias se acentuaron más en ésta última variable.

En los tratamientos con residuos de excavación, las arcillas contenidas se asociaron a la materia orgánica humificada de las compostas, por lo que al final del experimento, estos tratamientos fueron los únicos en los que se detectó la formación incipiente de estructura (particularmente el tratamiento 2). La estructura conlleva diversas ventajas a un suelo porque mejoran propiedades directamente relacionadas con el cultivo como la porosidad, el drenaje, la aireación de las raíces, la estabilización de la materia orgánica y contribuye a evitar la compactación del suelo (Siebe, *et al.*, 2016; WRB, 1999; Brady, 1999). A diferencia, los tratamientos 4 y 5 elaborados a partir de residuos de construcción, son porosos porque poseen partículas de mayor tamaño (5 mm) y que tardarán más tiempo en formar estructura. Originalmente se escogió este tamaño de partícula porque cuando los suelos se colocan en contenedores tienden a compactarse desfavoreciendo el desarrollo del sistema radical (CNA, 1989).

Los tratamientos con mayor porcentaje de porosidad fueron el 3, 6 y 7. Esta característica permitió que las plantas desarrollaran un sistema radical importante, particularmente en el tratamiento 3, que no contenía compostas, pero sí una cantidad importante de biocarbón (45%). Las plantas de este tratamiento llegaron a presentar el sistema radical más desarrollado de todos los tratamientos, incluyendo las raíces finas que son relevantes porque se encargan de llevar a cabo la absorción de nutrientes y el intercambio de gases (Azcón-Bieto, *et al.*, 2008). Si el biocarbón hubiera estado “inoculado” probablemente hubiera sido más competitivo. En contraparte, el menor porcentaje de porosidad se presentó en los tratamientos 4 y 5, ambos tratamientos tenían en común residuos de construcción. Dentro de este grupo, pero con una porosidad un poco mayor, fueron los tratamientos 1 y 2 que contenían residuos de excavación. Todos los tratamientos presentaron densidades aparentes menores a 0.9, ideales para favorecer el crecimiento del sistema radical de las plantas (Siebe, *et al.*, 2016). No obstante, en los tratamientos 6, 7 y 3 la alta porosidad y la baja densidad aparente generaron un drenaje acelerado, lo que implicaría un gasto excesivo de agua (un recurso escaso en las ciudades), para

mantener las plantas a capacidad de campo. Por ello, en estos tratamientos la porosidad y la densidad aparente, fueron evaluadas con una calidad media.

Las compostas contienen cantidades significativas de nutrimentos esenciales, incluyendo N, P, K, Ca, Mg y S, así como una variedad de oligoelementos esenciales (Haug, 1993; Smith y Collins, 2007). Por ello, son consideradas como un fertilizante orgánico multinutritivo (Hartmann, 2003; Amlinger *et al.*, 2007). El nutrimento que más requieren las plantas para poder crecer es el nitrógeno y el más escaso en la naturaleza es el fósforo (Belda, *et al.*, 2013). De los residuos empleados, los únicos con la capacidad de abastecer nitrógeno fueron principalmente las compostas y en mucho menor medida los trozos de madera. La composta proveniente de la planta de compostaje de la Ciudad de México contuvo una mayor concentración de nitrógeno y fósforo que la lombricomposta (8500 mg kg<sup>-1</sup> y 2097 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente). En este caso es importante considerar que todos los tratamientos con lombricomposta (tratamientos 2, 5 y 7; 45%), contienen casi el doble de cantidad en volumen, que los tratamientos en los que se aplicó composta (tratamientos 1, 4 y 6; 25%). Estos últimos tratamientos se mezclaron con biocarbón (20%), en vez de casi duplicar el volumen de composta. A pesar de esto, los tratamientos 6 y 4 (con composta y biocarbón) son los que presentan la mayor cantidad de nitrógeno (3.2 kg m<sup>-2</sup> y 2.7 kg m<sup>-2</sup>, respectivamente) seguidos por los tratamientos 7, 5, 2 (con lombricomposta) y 1 (con composta y biocarbón). El tratamiento 3 carece por completo de compostas, solo contiene residuos de excavación, biocarbón y trozos de madera. Este tratamiento presentó la cantidad de nitrógeno más reducida de todos los tratamientos, y fue el tratamiento en el que las plantas de frijol mostraron el peor desempeño, a pesar de que se aplicaron pequeñas y continuas dosis de fertilizante. En los análisis de componentes principales de crecimiento, se puede observar al nitrógeno como la variable con más peso en el CP2, misma que covaría de manera positiva con las variables de crecimiento y biomasa. En cuanto a las concentraciones totales (mg kg<sup>-1</sup>) de K, Ca y Mg, ambas compostas presentan una mayor concentración de K y Mg que el resto de los residuos. La concentración de K es similar en ambas compostas y la concentración de Ca y Mg es más alta en la composta de la Ciudad de México que en la lombricomposta, sobre todo del primer nutrimento. No obstante, la cantidad de bases intercambiables en todos los tratamientos fueron evaluadas como regulares.

Una de las ventajas más importantes que tiene la aplicación de compostas en este tipo de suelos artificiales es el aporte de microorganismos benéficos para las plantas. El proceso biooxidativo del compostaje implica la intervención de numerosos y variados microorganismos (bacterias, actinomicetes, hongos, algas, protozoos, y cianofíceas), que transforman los residuos frescos en un material más humificado y estabilizado que es la composta (Costa *et al.*, 1991; Hue y Liu, 1995; Adami *et al.*, 1997). En el caso de la lombricomposta, las lombrices son las que toman un papel preponderante. La especie de anélido más frecuentemente empleada (incluyendo nuestro estudio) es *Eisenia foetida*. En un trabajo realizado por Lazcano y colaboradores en 2008, se han reportado concentraciones de nutrimentos más altos en la lombricomposta que en la composta. Las lombrices de tierra aceleran la degradación de la materia orgánica y las lombricompostas suelen ser más estables que las compostas, con una mayor disponibilidad de nutrimentos y mejores propiedades microbiológicas (Anastasi *et al.*, 2005; Lazcano *et al.*, 2008). La diversidad de microorganismos está asociada al número de nódulos en las raíces de las plantas (Domínguez *et al.*, 1997).

En este estudio no realizamos un análisis molecular de la diversidad de la microbiota, sin embargo, en todos los tratamientos en los que se aplicó lombricomposta la cantidad de nódulos simbióticos en las raíces de las plantas, fue mayor que en los tratamientos correspondientes con composta y biocarbón. Las plantas del tratamiento 3 que carecieron de compostas presentaron la densidad de nódulos más baja de todos los tratamientos. Muchas especies del género *Phaseolus* (Familia: Fabaceae) tienen la capacidad de establecer asociaciones de tipo simbiótico con bacterias diazótrofes del género *Rizhobium*. Como resultado de esta asociación se forman nódulos en las raíces de las plantas que tienen la capacidad de transformar el nitrógeno atmosférico y hacerlo disponible para las plantas (Boulbaba *et al.*, 2020). A pesar de que la cantidad de nitrógeno es mayor en los tratamientos con composta, los tratamientos con lombricomposta presentan una mayor diversidad de microorganismos que las compostas. Evidencias de esto es el mayor número de nódulos que se presentaron en las raíces de los tratamientos 2 y 7 que incluyen lombricomposta en su mezcla.

El pH afecta la actividad de los microorganismos, probablemente por esto la densidad de nódulos en el tratamiento 5 (con residuos de construcción, pH 7.8), fue menor que en los tratamientos 2 y 7 (sin residuos de construcción, pH 7.4). La capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico permite que las leguminosas y en este caso el frijol, pueda ser cultivado favorablemente en suelos incipientes con una baja disponibilidad de nutrimentos, aunque su desempeño no será el mejor, las plantas pueden crecer y tener una producción considerable. En estas etapas iniciales de los suelos artificiales las leguminosas podrían servir para mejorar las condiciones de nitrógeno en estos suelos.

El pH también es relevante porque afecta la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, muchas plantas y organismos edáficos prefieren condiciones específicas de pH, por lo tanto, influye en su vitalidad. El pH óptimo para el crecimiento de plantas debe oscilar entre 6.0 y 7.5 (Craul, 1999). De los residuos empleados para elaborar los Tecnosoles, los residuos de excavación y construcción junto con el biocarbón tienden a ser alcalinos (8.2 y 8.8 respectivamente). La composta y la lombricomposta tienen pHs ligeramente ácidos (6.9), a diferencia el pH de la madera, que es el único residuo moderadamente ácido (5.3). Las diferentes mezclas de los residuos generaron valores de pH que fluctuaron entre 7.4 y 8.7. Como se había planteado originalmente, las compostas disminuyeron el pH de los suelos artificiales, sin embargo, no a los niveles ligeramente ácidos en los que se presenta la mayor disponibilidad de nutrimentos para las plantas.

Los tratamientos 1, 3, 4 y 6 presentaron pHs que van de moderado a fuertemente alcalinos. El Tecnosol más alcalino fue el tratamiento 3 (8.7), que contenía residuos de excavación (ligeramente alcalino 7.7) y biocarbón (fuertemente alcalino 8.7), ambos residuos alcalinos y carecía de residuos orgánicos que pudieran aminorar esta alcalinidad. Los restantes tres tratamientos presentaban una concentración menor de biocarbón y tenían un pH moderadamente alcalino (8.1 – 8.4). Por el contrario, los tratamientos 2, 5 y 7 que carecían de biocarbón tuvieron un pH que fluctuó entre ligera y moderadamente alcalino (7.4 - 7.8). Todos los tratamientos en los que se aplicó biocarbón, presentaron pHs más alcalinos que su par correspondiente (los valores de los tratamientos 1, 4 y 6, fueron mayores que los tratamientos 2, 5 y 7 respectivamente), por lo que podemos afirmar que el residuo más alcalinizante fue el biocarbón. En otros estudios en los que se ha caracterizado

el biocarbón, el pH ha fluctuado de ácido a alcalino (6.2 a 13), con una media de 8.1 (Chang y Xu, 2009; Srinivasarao *et al.*, 2013; Escalante *et al.*, 2016). Para el caso de los materiales de construcción, Rokia *et al.*, 2014, propusieron la utilización de escombros de demolición para la elaboración de Tecnosoles y obtuvieron un valor altamente alcalino de este material (10.3).

Solamente los tratamientos 2, 5 y 7 tuvieron pHs en el intervalo propuesto por Craul, que es el mismo intervalo considerado ideal para el cultivo del frijol. Incluso se menciona que esta especie puede desarrollarse en pHs que alcanzan valores de hasta 8.5 (Fageria y Barbosa Filho, 2008). Los tratamientos con los pHs más bajos coinciden con los valores más altos obtenidos en las variables aéreas de crecimiento y productividad. Estos resultados pueden ser atribuidos al alto contenido de lombricomposta, pues se ha reportado que en general las compostas son enmiendas acidificantes (Kögel-Knabner *et al.*, 1996; Diez y Krauss, 1997; Kahle y Belau, 1998; Stamatiadis *et al.*, 1999). En nuestro estudio, la composta y la lombricomposta tuvieron pHs muy ligeramente ácidos (6.9 y 6.8 respectivamente), el único residuo que resultó moderadamente ácido (5.3) es la madera. Cabe mencionar que los efectos de las compostas pueden variar dependiendo de su composición, por ejemplo, Gong y colaboradores (2018) analizaron el crecimiento del geranio y la caléndula, en sus resultados obtuvieron valores de pH de 7.4 para el caso en donde se utilizó como medio de cultivo la lombricomposta, y valores de pH de 8.2 en donde sólo se utilizó composta.

El importante papel que juega el pH en el suelo también se vio reflejado en los resultados obtenidos en los ACP de crecimiento y productividad, el valor de esta variable covarió de manera negativa con los valores de altura, cobertura, diámetro, biomasa de la planta, biomasa de vainas y semillas, así como el número de vainas. Los valores de estas variables fueron más altos a medida que los valores de pH eran menores. Ninguno de los tratamientos tuvo valores de pH ácidos, los valores más bajos fueron cercanos a la neutralidad. Sin embargo, podemos afirmar que el buen desempeño que se presenta en los tratamientos 1, 2, 4, 5, 6 y 7 en comparación con el tratamiento 3 se debe en buena parte a la diferencia en el pH.

La conductividad eléctrica es una variable relevante porque nos indica la presencia de salinidad y sodicidad (Siebe, *et al.*, 2016). Una alta conductividad eléctrica (<4

mS cm<sup>-1</sup>) puede causar efectos adversos en el crecimiento de la planta (por ejemplo, baja tasa de germinación o marchitamiento). Además, la alta conductividad eléctrica refleja los altos niveles de sal en la fase soluble del suelo, al aumentar el potencial osmótico, limitan la disponibilidad de agua para la planta y la absorción de nutrimentos (Belda *et al.*, 2013). En lo que respecta a la conductividad eléctrica, el tratamiento 7 fue el que presentó la conductividad eléctrica más baja (7 0.9 mS cm<sup>-1</sup>) de todos los tratamientos. Niveles que no restringen el desarrollo de ningún cultivo. En el resto de los tratamientos la conductividad eléctrica fue baja, no afecta el cultivo de frijol, pero podría llegar a afectar el desarrollo de cultivos sensibles (Siebe, *et al.*, 2016).

El carbono es un elemento que también se encuentra en los residuos orgánicos (compostas, biocarbón y trozos de madera) y está asociado a la concentración de nitrógeno. La relación C/N es relevante para la mineralización, entre más estrecha es la asociación (10) más disponibles estarán los nutrimentos para las plantas (Lv *et al.*, 2018). En los tratamientos 2, 5, 7 y 6 la relación C/N fluctuó de 12.6 a 16.6, los tres primeros también fueron los que obtuvieron los mejores desempeños en cuanto a crecimiento y productividad. Por el contrario, el tratamiento 3 es el que presenta el valor más alto de la relación C/N (40), consecuencia de la importante proporción de biocarbón, y presenta el peor desempeño en el experimento. Se sabe que bajo estas condiciones la mineralización de la materia orgánica se ve reducida (Lv *et al.*, 2018), por lo que la disponibilidad de nutrimentos, particularmente de nitrógeno, también disminuye. El pH y la relación C/N son muy altas en este suelo artificial. El pH de este suelo tiene un valor de 8.2 por lo que la movilidad de nutrimentos se ve reducida, aunado a la alta relación C/N (40), afectan el crecimiento y por ende la productividad de las plantas de frijol. No obstante, presenta un almacén importante de carbono, porque el biocarbón es un residuo más resistente a las condiciones ambientales por lo que las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (óxido nitroso, metano; Sohi *et al.*, 2009) serían menores a los de otros suelos artificiales, sobre todo los más orgánicos (tratamientos 6 y 7).

El fósforo es el nutrimento más escaso en la naturaleza (Valverde *et al.*, 2005). La principal fuente de fósforo en este estudio también fueron las compostas, nuevamente la composta de la Ciudad de México superó a la lombricomposta en la

concentración de este nutrimento. Sin embargo, al transformar los datos a unidades de volumen ( $\text{kg m}^{-2}$ ), los tratamientos con lombricomposta (2 y 5) resultaron con la mayor concentración. En todos los tratamientos la cantidad de este nutrimento fue alta y en los ACP no resultó una variable relevante.

En cuanto a las bases intercambiables (K, Ca, Mg), ambas compostas presentan una mayor concentración de K y Mg que el resto de los residuos. La concentración de K es similar en ambas compostas y la concentración de Ca y Mg es más alta en la composta de la Ciudad de México que en la lombricomposta, sobre todo en el primer nutrimento. No obstante, el aporte más importante de calcio proviene de los residuos de construcción. La base intercambiable más relevante según los ACP de crecimiento y productividad fue el calcio. Se puede observar que el tratamiento 5 (con residuos de construcción) está orientado hacia el vector de calcio, y en menor medida al potasio, los tratamientos 6 y 7 están orientados hacia el N y Mg.

Con base en la literatura, se esperaba obtener mejores resultados en los tratamientos con biocarbón, diversos autores lo mencionan como una enmienda de suelos agrícolas (e.g. Yamoah *et al.*, 2002 e Ippolito *et al.*, 2011), que recupera las funciones del suelo, y que interviene en los procesos que en él se desarrollan (Verheijen *et al.*, 2009). Al aplicar biocarbón al suelo se mejora el drenaje por el incremento en la porosidad, pero al mismo tiempo incrementa la capacidad de retención de agua, aunque no necesariamente disponible para las plantas (McLaughlin, 2009; De Gryze *et al.*, 2010). Sin embargo, cabe aclarar que las propiedades que el biocarbón confiere son muy variables y dependen del material empleado, la temperatura que alcanzó en la pirólisis y la edad del residuo (Escalante, *et al.*, 2017). El biocarbón que se utilizó en este experimento tuvo como materia prima astillas mixtas de eucalipto y otro tipo de maderas, que se pirolizaron a una temperatura de 600-775°C. Lehmann (2007) considera que la temperatura óptima de pirólisis para fines agrícolas se encuentra entre los 450 y 550 °C (intervalos menores a los utilizados en nuestro biocarbón). Además de ser un material relativamente joven, el cual no fue “inoculado” previamente con composta, por lo que no pudo cumplir con la función de actuar como fertilizante de liberación lenta, proporcionando paulatinamente nutrimentos al suelo. Por el contrario, en el tiempo en que se realizó el experimento los Tecnosoles con biocarbón estaban en la etapa inicial de tal forma que el biocarbón más que proporcionar nutrimentos

funcionó como secuestrador de estos. Estos factores pudieron ser claves para que no se obtuvieran los resultados esperados.

Se sabe que el biocarbón tiene la capacidad de adsorber fuertemente nutrientes en sus formas disponibles para las plantas (Lehmann, 2007), este proceso se presentó en los tratamientos 1, 3, 4 y 6, sobre todo porque el biocarbón no había sido “inoculado”. La adsorción de iones se debe a que las cargas superficiales del biocarbón son positivas y el pH es alcalino, principalmente en el biocarbón recién preparado. A medida que avanza el tiempo, se generan más cargas negativas que positivas y se incrementa la acidez superficial con el consecuente decrecimiento de la basicidad (Cheng y Lehmann, 2009). Los cambios en las cargas superficiales del biocarbón están correlacionados muy fuertemente con el tiempo y las temperaturas anuales medias (Cheng *et al.*, 2008). Los datos de las variables edáficas provienen de muestras colectadas al inicio del experimento, cuando el biocarbón comenzaba a absorber los nutrientes, por eso no se observan tan claramente las diferencias entre los tratamientos. La concentración de carbono (de 14% a 30%) y nitrógeno (de 0.73% a 1.81%) en los tratamientos con compostas fue mayor que en los tratamientos con lombricompostas (de 8.3% a 21.6% de carbono y de 0.63% a 1.41% de nitrógeno), en todos los Tecnosoles con composta y biocarbón (1, 4 y 6), la cantidad de P fue menor en comparación a los tratamientos con lombricomposta (de 0.61 kg m<sup>-2</sup> a 0.68 kg m<sup>-2</sup>), lo mismo ocurrió con el K en donde sólo se tuvieron concentraciones de 1.8 kg m<sup>-2</sup> a 3.7 kg m<sup>-2</sup>. En comparación con los tratamientos con lombricomposta, el tratamiento 2 alcanzó una concentración de 0.93 kg m<sup>-2</sup> de P y 3.1 kg m<sup>-2</sup> de K. El tratamiento 3 tuvo el valor más bajo de N (0.47%) y de Ca (7.5 mol<sub>c</sub> m<sup>-2</sup>) esto pudo deberse a que carecía de compostas, además de que la cantidad de biocarbón fue la más alta de todos los tratamientos y al no estar “inoculado”, adsorbería una cantidad importante de nutrientes.

## 7.2 Principales limitantes de los Tecnosoles recomendados por sus propiedades edáficas y desempeño de plantas para el cultivo de frijol

El tratamiento 3 es evaluado de baja calidad porque presenta la mayor cantidad de limitantes edáficas y por consiguiente el peor desempeño de las plantas de frijol. Las principales limitantes edáficas de este tratamiento son: su amplia relación C/N

(40), pH fuertemente alcalino (8.7), porosidad excesiva, densidad aparente muy baja y poca disponibilidad de bases intercambiables y nitrógeno, probablemente ocasionada por la retención de nutrientes del biocarbón. No es de extrañar que todas las variables de crecimiento y productividad presentaron los valores y rendimientos más bajos de los siete tratamientos.

El siguiente Tecnosol con más limitantes edáficas es el tratamiento 1, con una evaluación de calidad intermedia. Las principales limitantes edáficas están relacionadas con el pH moderadamente alcalino (8.3), relación C/N de 20.4 y una regular disponibilidad de bases intercambiables. La mayor parte de las variables de crecimiento y productividad (excepto la biomasa total y la biomasa de vainas y semillas) fueron evaluadas regulares.

Los restantes Tecnosoles (2, 4, 5, 6 y 7) presentan los mejores despeños en cuanto a crecimiento y productividad. Solo los tratamientos 4 y 6 tuvieron valores medios en las variables diámetro y altura respectivamente. Sin embargo, existen diferencias en cuanto a propiedades edáficas que determinan las diferencias en su evaluación.

El tratamiento 7 posee propiedades edáficas muy favorables para el cultivo de frijol, su conductividad eléctrica es baja, y su disponibilidad de N y P, dos de los nutrientes más relevantes para el crecimiento de las plantas, son evaluados como muy altos. Sin embargo, la deficiencia que tiene este Tecnosol es su baja densidad aparente y su alta porosidad, que influyen en su función de dar soporte, sobre todo si se quieren cultivar plantas de porte alto como el maíz. Su drenaje era excesivo, era el más seco de todos los tratamientos y marcaba la frecuencia de riego en el experimento. Para mantener estos suelos a su capacidad de campo era necesario regar más frecuentemente que en otros Tecnosoles de buena calidad. No recomendado en ciudades donde la disponibilidad de agua es limitada, como en la Ciudad de México. Otro aspecto que debe considerarse son las emisiones de gases de efecto invernadero. El tratamiento 7 posee exclusivamente residuos orgánicos lábiles, y aunque no pudimos realizar evaluaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, dióxido de carbono), por su origen orgánico, es de esperarse que sus emisiones sean mayores a las que producen otros suelos artificiales, como los mezclados con residuos de excavación o construcción y

principalmente, biocarbón (Schahczenski, 2010). Por lo anterior, descartamos recomendar a este Tecnosol para destinarlo al cultivo de plantas comestibles.

El tratamiento 6 es muy similar al tratamiento 7, sus dos principales limitantes son el pH moderadamente alcalino y las bases intercambiables evaluadas como regulares. A diferencia del tratamiento 7 una parte importante del carbono que posee está en forma de biocarbón, que no es fácilmente degradado por los microorganismos, así que se esperaría que sus emisiones de carbono fueran menores que en el tratamiento 7. Si se mejoran sus condiciones de pH, y el biocarbón se inoculara previamente, este Tecnosol podría ser una excelente alternativa para emplearlo en viveros tecnificados que empleen contenedores pequeños para su producción de plantas.

Los tratamientos 2, 4 y 5 presentan muy buenas condiciones edáficas para el crecimiento de las plantas. En los tratamientos 2 y 5 los problemas estarían concentrados en el pH, que es ligeramente alcalino y también en cuanto a emisiones de gases de CO<sub>2</sub> que en este caso se evaluarían como regulares en comparación con los tratamientos que contienen biocarbón. Las bases intercambiables también son evaluadas como regulares en ambos Tecnosoles. El tratamiento 4 tiene un potencial muy grande para convertirse en un excelente suelo artificial para propagar plantas comestibles. Además de contar con las propiedades ventajosas de los tratamientos 2 y 5 posee biocarbón, por lo que adicionalmente contribuiría a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso y dióxido de carbono), transformando a este suelo en un Tecnosol sostenible y de bajo impacto ambiental. En el tratamiento 4, las principales limitantes serían el pH, las bases intercambiables y la relación C/N, las tres evaluadas como regulares. Estos inconvenientes pueden corregirse fácilmente, acidificando el suelo con azufre, inoculando el biocarbón previamente y cultivando leguminosas al inicio para incrementar la disponibilidad de nitrógeno.

### 7.3 Análisis de rasgos funcionales

En este trabajo, los rasgos funcionales de la planta de frijol se emplearon para entender las compensaciones coordinadas entre la adquisición de recursos y la conservación de éstos (es decir, la persistencia). En este apartado se discutirán los

rasgos funcionales que resultaron mayormente representativos y se dará una breve explicación de los posibles factores que pudieron haber afectado estos procesos. Posteriormente, en el siguiente apartado se profundizará en la posible relación de los rasgos de diferentes órganos y cómo ha sido abordado este tema en la literatura.

Para medir las compensaciones anteriormente mencionadas, se utiliza el espectro económico de plantas, el cual sugiere que los individuos que se localizan en el extremo “rápido” (o adquisitivo), tienen un alto potencial de crecimiento porque tienen una alta capacidad para mover agua y así adquirir nutrimentos y luz para fijar carbono, pero construyen tejidos endebles y desechables y son menos tolerantes a los bajos recursos (ya sea agua, nutrimentos o luz). En contraste, las plantas con rasgos “lentos” (o conservativos), están mejor protegidos de las altas pérdidas de carbono (baja respiración, bajas tasas de rotación de la hoja) y el estrés por sequía (por ejemplo, mayor capacidad para resistir el bajo potencial de agua sin pérdida de turgencia) (Reich, 2014).

Como se esperaba, se encontraron covariaciones positivas entre variables que denotaron un manejo de recursos de tipo adquisitivo, tal fue el caso de los rasgos funcionales radical área superficial específica y longitud radical específica, mismas que covariaron de manera opuesta con el rasgo densidad de tejido radical, el cual indica un manejo de recursos conservativo. El análisis de componentes principales señaló también que, en la parte foliar se dio una covariación opuesta entre las variables área foliar específica (rasgo representativo de un manejo adquisitivo) y la densidad del tejido foliar (rasgo representativo de un manejo conservativo). Esto nos ayuda a entender las condiciones bajo las cuales se desarrollaron las plantas, es decir, las especies con rasgos “rápidos” nos indican que crecen mejor y dominan en condiciones de recursos más altos, tal fue el caso de los tratamientos 2, 4, 5, 6 y 7 con resultados favorables en la mayoría de rasgos funcionales medidos, a diferencia de las especies “lentas” que pueden sobrevivir mejor cuando los recursos son escasos (Reich, 2014), que en este experimento fueron los tratamientos 1 y 3.

El área foliar específica es un rasgo importante pues además de ser uno de los parámetros que forma parte del espectro económico de hojas (SLA, por sus siglas en inglés), también nos indica el costo de construir un milímetro cuadrado de área

foliar. Los tratamientos que tuvieron una baja área foliar específica (1 y 3), también presentaron una alta densidad de tejido foliar, a diferencia de los tratamientos 6 y 7 que tuvieron una mayor área foliar específica y menor densidad de tejido foliar. Nuestros resultados son congruentes con lo reportado en la literatura pues se menciona que especies con baja área foliar específica tienen alta inversión en defensas estructurales y alta longevidad foliar, mientras que especies con alta área foliar específica tienen altos contenidos de nitrógeno en las hojas y altas tasas fotosintéticas (Reich *et al.*, 1999, Niinemets 2001, Wright *et al.*, 2004).

### 7.3.1 Relación entre rasgos de diferentes órganos

En las últimas décadas, en diversos trabajos se han encontrado de manera parcial, relaciones entre los rasgos funcionales de hojas y raíces (paralelismo), no obstante, también existen trabajos en los que no se han encontrado estas relaciones (Wright *et al.*, 2004; Craine *et al.*, 2005; Chave *et al.*, 2009; Baraloto *et al.*, 2010). Esto nos lleva a preguntarnos si los síndromes de rasgos de hoja, tallo y raíz están coordinados representando un solo eje de variación, o si estos son en gran medida independientes. A continuación, hablaremos de algunos trabajos en donde se han encontrado resultados de ambas vertientes y reportaremos lo que se obtuvo en este estudio.

Es importante mencionar que el estudio de rasgos funcionales se ha profundizado y ha tenido un alto alcance en plantas silvestres, pero no así en plantas cultivadas, por lo cual se tiene poca información respecto al comportamiento del espectro económico que se lleva a cabo en las plantas de cultivo. Por ello resulta de sumo interés el comportamiento que tuvieron las plantas de frijol en este experimento, contribuyendo a obtener información al acervo de plantas cultivadas. Si bien el paralelismo entre rasgos aéreos y radicales sigue en discusión, hablaremos a cerca de algunos trabajos que se han realizado y los resultados interesantes que surgieron de éstos, haciendo una comparación con lo que se obtuvo en este trabajo. Reich en 2012 propuso que ser rápido en cualquier nivel de órgano (hoja, tallo o raíz) al adquirir o usar carbono, nutrimentos o agua, requiere ser rápido para los otros recursos en el mismo nivel de órgano; y ser rápido para todos los recursos en cualquier nivel de órgano (por ejemplo, el nivel de la hoja) requiere ser rápido para

todos los recursos en los niveles de otros órganos (por ejemplo, niveles de tallo y raíz). Por lo tanto, a pesar de que los diferentes rasgos son de importancia central en términos de selección en diferentes condiciones (Díaz *et al.*, 2016), la coordinación entre rasgos, órganos y recursos da como resultado plantas rápidas o lentas en diferentes sistemas que aún convergen en una estrategia ecológica respectiva rápida o lenta.

Varios han sido los trabajos que apoyan dicha idea, particularmente se han encontrado correlaciones entre rasgos funcionales de raíces con el espectro económico de hojas. Tal es el caso de Ryser (1996) quien encontró una relación entre la densidad del tejido de la hoja y la raíz en cinco especies de gramíneas, dos rasgos que también se correlacionaron positivamente con la vida útil del tejido. Asimismo, las relaciones entre área foliar específica y área superficial específica fueron significativas en el trabajo realizado por Wright y Westoby (1999) con plántulas de 33 arbustos leñosos y especies arbóreas, lo mismo sucedió en los trabajos de Withington *et al.*, (2006) y Freschet *et al.*, (2010) con 16 especies leñosas y 24 especies herbáceas.

Blackman *et al.*, (2010) y Markesteijn *et al.*, (2011), al igual que Savage y Cavender-Bares (2012) encontraron compensaciones similares de los rasgos del tallo y la hoja en un estudio de sauces y álamos. La explicación que se da ante el paralelismo entre rasgos de diferentes órganos es que, debido al pequeño número de recursos acoplados de la economía de las plantas, una estrategia adquisitiva o conservativa requiere conjuntos similares de rasgos de hojas, raíces y tallos, independientemente de si el principal factor limitante es la luz, el N, el P, el agua o la temperatura.

Por otro lado, también existen trabajos en donde no ha existido una correlación directa entre diferentes rasgos aéreos con rasgos subterráneos, tal es el caso del trabajo realizado por Tjoelker *et al.*, (2005), en éste se menciona que los síndromes de economía de recursos que se han observado ampliamente en las hojas no pueden extrapolarse directamente a las raíces, o al menos pueden no ser directamente comparables entre las raíces y los brotes. Asimismo, Reich (2014) reporta que existen varias líneas de evidencia que apoyan los ejes hipotéticos de variación de rasgos múltiples para hojas, tallos y raíces, cada uno visto de forma

independiente (e. g., Wright *et al.*, 2004; Craine *et.al.*, 2005; Chave *et al.*, 2009; Baraloto *et al.*, 2010).

En este trabajo no se encontró una coordinación directa entre rasgos foliares y radiculares. Como se presentó en las Figuras 21 y 22, las variables aéreas y radiculares tuvieron un comportamiento ortogonal, es decir, no hubo relación entre los pares de rasgos análogos. Esto se comprobó también con el acomodo de los tratamientos en el análisis de componentes principales, pues al no tener valores altos para un manejo de recursos de manera general, todos los datos se agruparon en el centro del gráfico.

Los resultados anteriores se pueden deber en gran medida al tipo de Tecnosol en el cual se desarrollaron las plantas de *Phaseolus vulgaris*. El tratamiento 3 fue uno de los suelos en el que las plantas, tuvieron un menor rendimiento aéreo a diferencia de los tratamientos 2, 5 y 7, identificándose un manejo de recursos de tipo conservativo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que este tratamiento también fue el que presentó un valor de densidad aparente bajo ( $0.54 \text{ g cm}^{-3}$ ), y valores de longitud radical específica altos. Este tratamiento contenía biocarbón que no fue inoculado previamente, lo que a su vez pudo haber ocasionado una adsorción de los nutrimentos haciéndolos poco disponibles, por lo menos en un principio, además de que carecía de composta. Estos factores pudieron haber contribuido a que las raíces se extendieran más en busca de nutrimentos para proporcionar a la planta, este desarrollo del sistema radical solo pudo ser posible gracias al alto porcentaje de poros (74.2%) en este suelo.

Por otra parte, en las raíces de los tratamientos de mayor fertilidad (2, 5 y 7) sucedió lo contrario, pues estos tratamientos no contenían biocarbón en su composición que adsorbiera los nutrimentos del suelo, esto se vio reflejado en el acomodo de los valores de estos tratamientos en el análisis de componentes principales, pues se situaron cerca de los vectores AFE, N y Mg. Por lo tanto, podríamos sugerir que las raíces no se vieron forzadas a buscar nutrientes en zonas más lejanas, fueron abastecidos suficientemente por la composta incluida en el Tecnosol. Otro factor importante fue la capacidad de retención de agua disponible, la cual fue mayor en los tratamientos 2 y 7, los cuales también tuvieron valores altos en rasgos foliares que denotan un manejo de recursos adquisitivos y valores bajos para los rasgos

análogos de raíces, pues no fue necesario que las raíces exploraran más allá pues el recurso hídrico no fue escaso.

Otro factor importante para tomar en cuenta es el componente biótico del suelo (patógeno y mutualista). Su importancia radica en que éste es diferente al existente en el aire, presentando síndromes económicos de recursos fundamentalmente diferentes en las raíces en comparación con las hojas (Mommer, *et al.*, 2012). En nuestro caso, fueron contabilizados los nódulos en las raíces de las plantas de frijol, lo cual arrojó resultados interesantes, constatamos que a pesar de que las raíces de plantas desarrolladas en los mejores tratamientos tuvieron un manejo conservativo, presentaron la mayor cantidad de nódulos, el número de nódulos fue menor en las raíces de las plantas del tratamiento 3, con un manejo adquisitivo de los recursos. Esto podría deberse a la adición de las compostas, las cuales albergan gran cantidad de microbiota, la cual pudo haberse asociado con las plantas de frijol. Incluso pudo observarse que en todos los tratamientos en los que se aplicó composta (tratamientos 1, 4 y 6) la cantidad de nódulos fue menor que en los tratamientos correspondientes en los que se aplicó lombricomposta (tratamientos 2, 5 y 7) con un manejo conservativo en el sistema radical. Este fenómeno ocurre gracias a la asociación entre bacterias rhizobiáceas, conocidas genéricamente como "rizobios", las cuales forman asociaciones simbióticas con raíces de plantas leguminosas, como el frijol. Durante la simbiosis, estas bacterias inducen la formación de un nuevo órgano en la raíz de la leguminosa, a los que se denomina nódulo, en el cual viven las bacterias y llevan a cabo el proceso de fijación biológica del nitrógeno atmosférico. Gracias a este proceso, la planta utiliza el amonio sintetizado por los nódulos y así se provee de las fuentes de nitrógeno que requiere para vivir (Quinto *et al.*, 2017). Con esto podemos decir que el hecho de que las raíces de los tratamientos con rendimiento menor hayan tenido un desarrollo adquisitivo, no necesariamente implicó que estuvieran aprovechando de manera rápida los recursos presentes en el suelo, sino todo lo contrario, al estar en condiciones precarias en cuanto a nutrimentos y biota, tuvieron que explorar una superficie mayor para encontrar tales recursos, invirtiendo una cantidad baja de carbono en sus tejidos, a diferencia de las raíces los tratamientos de mejor calidad, con tejidos más densos.

Como pudimos ver, en este estudio no se obtuvo un paralelismo entre los rasgos aéreos y radicales, esto se debió en gran medida al tipo de suelo que se tuvo en cada tratamiento. Se debe tener en cuenta también que la evolución y la biofísica establecen restricciones de compensación (Reich *et al.*, 1999; Körner, 2013) e impulsan la adquisición de múltiples recursos para que se acoplen y se vinculen entre los sistemas de órganos, esto generalmente limita a las plantas a ser generalmente rápidas o lentas (o intermedias) en todos los recursos y sistemas de órganos.

## VIII. Conclusiones

Las compostas, la madera trozada y el biocarbón, además de los residuos de excavación y construcción, pueden emplearse para elaborar suelos artificiales funcionales. No obstante, es importante realizar análisis de metales pesados en las compostas que se elaboren industrialmente. Una mejor alternativa es elaborar compostas de forma casera para tener un mejor control de los residuos.

Elaborar Tecnosoles a partir del reciclaje de residuos urbanos, los convierte en una alternativa viable y sostenible ante la extracción del suelo forestal. Los siete Tecnosoles cumplieron con las funciones que llevan a cabo los suelos naturales destinados a la agricultura. En nuestro caso favorecieron el crecimiento y la productividad de *Phaseolus vulgaris* L., a pesar de que no se aplicaron fertilizantes en los tratamientos (excepto el tratamiento 3, con el peor desempeño).

El tratamiento 4 (con composta-biocarbón y residuos de construcción) resultó el mejor Tecnosol porque además de favorecer el cultivo de frijol, al contener biocarbón además de actuar como una enmienda, funciona como sumidero de carbono emitiendo menos gases de efecto invernadero, volviéndolos más sostenibles.

El biocarbón puede ser un excelente material para elaborar Tecnosoles, mejorando sus propiedades físicas y químicas. Se recomienda “inocular” el biocarbón previamente con composta para que pueda cumplir más rápidamente su función de aportar nutrimentos a las plantas. La alcalinidad que ocasionan los residuos de

construcción y el biocarbón, puede solucionarse aplicando azufre al suelo hasta alcanzar un pH entre 6.5 y 7.

Se presentó un claro espectro económico de recursos en *Phaseolus vulgaris*, por un lado, las hojas de las plantas de los mejores tratamientos (2, 4, 5 y 7) tuvieron un manejo de tipo adquisitivo, a diferencia del tratamiento con menor rendimiento (tratamiento 3) el cual tuvo un manejo de recursos de tipo conservativo. Sin embargo, el manejo de recursos en la parte subterránea se desarrolló en función de cada uno de los Tecnosoles, contrario a lo que se esperaba, los mejores tratamientos presentaron raíces con manejo de recursos conservativo y el peor tratamiento tuvo rasgos que se inclinaron más hacia un manejo adquisitivo.

En el caso de *Phaseolus vulgaris*, no se pueden homologar los rasgos de adquisición de recursos de hojas y raíces, éstos pueden variar dependiendo del medio en el que se desarrollan. En nuestro caso, las propiedades físicas y químicas del suelo tuvieron una gran influencia en el desarrollo de los rasgos funcionales, a tal grado que las raíces tuvieron un comportamiento contrario al que se obtuvo en la parte aérea.

## IX. Referencias

- Alvarenga, P., M. Farto, C. Mourinha y P. Palma. (2016). Beneficial use of dewatered and composted sewage sludge as soil amendments: Behaviour of metals in soils and their uptake by plants Waste Biomass Valori., 7. 1189-1201.
- Anastasi, A., G.C. Varese. 2005. Marchisio Isolation and identification of fungal communities in compost and vermicompost Mycologia, 97, pp. 33-44.
- Arancon, N.Q. Arancon, C.A. Edwards, A. Babenko, J. Cannon, P. Galvis, J.D. Metzger. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse Applied Soil Ecology, 39. 91-99.
- Azcón-Bieto, J., y Talón, M. (2003). Fundamentos de fisiología vegetal. McGrawHill. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barral, M. T., M. C. Arias y J. Guérif. 1998. Effect of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. Soil and Tillage Research 46(3): 261-272. DOI: 10.1016/S0167-1987(98)00092-0
- Brady, C. N. y R. R. Weil. 1999. The nature and properties of soils, Prentice Hall.
- Belda, R. M., D. Mendoza-Hernández y F. Fornes. 2013. Nutrient-rich compost versus nutrient-poor vermicompost as growth media for ornamental-plant production. Journal plants soils science., 176:827-835.
- Boulbaba L. N. Abdi, S. Smari, A. Ayari-Akkari, M. Jeridi, M. D. Alsenidi y B. Sifi. 2020. Effects of *Rhizobium* strain on the growth, nodulation, N<sub>2</sub> fixation and ions accumulation in vicia faba plant under salt stress. Legume Research- An International Journal, 43 (4): 573-579.
- Cadotte, M.W. 2011 Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. Journal of Applied Ecology. 48: 1079–1087.
- Castellanos, Z., H. Guzmán, M. Jiménez, C. Mejía, R. Muñoz y J. Acosta. 1997. "Hábitos preferenciales de los consumidores de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en México". Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 47(2): 137-163.
- Chapin, F.S. 2000. Consequences of changing biodiversity. Nature 405: 234–242.

- Cheng, C. H., J. Lehmann, y M. H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica and Cosmochimica. Acta* 72: 1598-1610.
- CNA, 1989. Manual de clasificación, cartografía e interpretación de suelos, con base en el sistema de clasificación de suelos. Comisión Nacional del Agua, México.
- Cram, S., H. Cotler, L. M. Morales, I. Sommer y E. Carmona. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito federal. *Investigaciones Geográficas* 66.
- Craul, P.J. 1999. *Urban Soils: Applications and Practices*. Wiley, E.U.A. 384 pp.
- Díaz, S., J. Kattge, J. H. C. Cornelissen, I. J. Wright, S. Lavorel, S. Dray y L. D. Gorné. 2016. The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529:7585,167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Doan, T. T., C. Bouvier, Y. Bettarel, T. Bouvier, T. Henry-des-Tureaux, J.L. Janeau, P. Lamballe, B.V. Nguyen y P. Jouguet. 2014. Influence of buffalo manure, compost, vermicompost and biochar amendments on bacterial and viral communities in soil and adjacent aquatic systems *Applied Soil Ecology*, 73: 78-86.
- Dominati E., M. Patterson y A. Mackay, 2010. Response to Robinson and Lebron — Learning from complementary approaches to soil natural capital and ecosystem services. Elsevier 139-140. [https://www.sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0921800910004179?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0921800910004179?via%3Dihub)
- Domínguez, J., C.A. Edwards y S. Subler. 1997. A comparison of composting and vermicomposting, *Biocycle* 4: 57-59.
- Effand, W. R. y R. V. Puyat. 1997. "The genesis, classification, and mapping of soils in urban áreas." *Urban Ecosystems*, 1: 217-228.
- Escalante Rebolledo, A., G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco y J. D. Etchevers Barra. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- Estrada-Salinas Fabiola. (2018). Indicadores de calidad de suelo y productividad en cultivos de maíz bajo diferentes tipos de manejo: una integración entre la percepción de los productores y la ecología funcional de plantas y suelos. (Tesis de maestría).

Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Ciudad de México.  
90 pp.

- Fageria, N. K. y M. P. Baobosa Filho. 2008. Influence of pH on productivity, nutrient use efficiency by dry bean, and soil phosphorus availability in a no-tillage system. *communications in soil science and plant analysis*, 39: 1016–1025. DOI: 10.1080/00103620801925422
- FAO-ISRIC-UNEP-CIP. 1998. Soil and terrain database for Latin America and the Caribbean—SOTERLAC (versión 1.0. CD-ROM), Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, the International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), the United Nations. Environment Programme (UNEP) and the International Potato Centre (CIP). Land and Water Digital Series, 5. FAO, Roma.
- Fischer, D. y B. Glaser. 2012. Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. En Kumar S. Management of Organic Waste, in Tech, Rijeka and Shanghai 167-198.
- Freschet, G.T., J.H.C. Cornelissen, R.S.P. van Logtestijn, y R. Aerts. 2010. Evidence of the “plant economics spectrum” in a subarctic flora. *Journal of Ecology* 98: 362– 373.
- Freschet, G. T., R. Aerts, y J. H. C. Cornelissen. 2012. A plant economics spectrum of litter decomposability. *Functional Ecology* 26: 56– 65. [https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1111/j.1365-2435.2011.01913.x](https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.1111/j.1365-2435.2011.01913.x)
- Gathorne-Hardy, A., J. Knight y J. Woods. 2009. Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertilizer to improve barley yields in the UK. *Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 6.
- Gong, X., S. Li, X. Sun, L. Wang, L. Cai, J. Zhang, y L. Wei. 2018. Green Waste compost and vermicompost as peat substitutes in growing media for geranium (*Pelargonium zonale* L.) and caléndula (*Calendula officinalis* L.). *Scientia Horticulturae*, 236: 186-191. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423818302279?via%3Dihub>
- Glinski J y J. Lipiec. 1990. Soil physical conditions and plant roots, CRC Press, Boca Raton. E.U.A. 260 pp.
- Granatstein, D., C. E. Kruger, H. Collins, S. Galinato, M. Garcia-Perez, y J. Yoder. 2009. Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment.

- Final report. Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources. Washington State University. Wenatchee, WA, USA. 181 pp.
- Grime, J. P. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist* 111: 982, 1169–1194.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2006. “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 5 Desechos. 631 pp.
- Hames, D. y N. Hooper. 2005. *Biochemistry*, 3rd. Edition, Nueva York, E.U.A. Taylor and Francis Group. 394-398 pp.
- Havlin, J.L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale y W. L. Nelson. (1999). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. Prentice-Hall. New Jersey, E. U. A. 499 pp.
- Ippolito, J. A., R. D. Lentz, M. J. Novak, K. A. Spokas, H. P. Collins, y J. Streubel. 2011. Biochar usage: Pros and cons. *Western Nutrient Management Conference*. Reno, NV, E.U.A. 9: 93-98.
- Jara-Samaniego, J., M.D. Pérez-Murcia, M.A. Bustamante, A. Pérez-Espinosa, C. Paredes, M. López, D.B. López-Lluch, I. Gavilanes-Terán, R. Moral. 2017. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production*. 141: 1349-1358.
- Jim C. Y. 1993. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical and subtropical urban habitats. *Environmental Conservation*. 20: (1) 35–49.
- Yang, J. L. y G. L. Zhang. 2015. Formation, characteristics and ecoenvironmental implications of urban soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 61: (1) 30-46.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill, New York. Lewis Publishers, Boca Raton, E.U.A. 343–436 pp.
- Lal, R., J. Kimble, E. Levine, C. Whitman. 1995. Towards improving the global database on soil carbon. En: Lal, R., J. Kimble, E. Levine, B.A. Stewart, EEditores). *Soils and Global Change*. Lewis Publishers.
- Lange, M., N. Eisenhauer, C. A Sierra, H. Bessler, C. Engels, R. I Griffiths y G. Gleixner. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications* 6: 1– 8. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1038/ncomms7707>

- Lavorel, S. y E. Garnier. 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* 16: 545–556.
- Lazcano, C., M. Gómez-Brandón, y J. Domínguez. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure *Chemosphere*. 72: 1013-1019. <https://www.sciencedirect.com/pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0045653508004797>
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers Ecology Environmental*. 5: 381-387.
- Lehmann, J., J. P da Sila Jr., C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, y B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon Basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343-357.
- Lomelí, R. D. L. 2018. Diseño de sustratos a partir de residuos sólidos urbanos con uso potencial en la construcción de azoteas verdes. (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX, México. 100 pp.
- López, L. 1993. The role of legumes crop in sustainable agriculture. The case of lupine. *Advances in Lupin Research. Agronomy & Production*. 272-289.
- Lv, B., D. Zhang, Y. Cui, y F. Yin. 2018. Effects of C/N ratio and earthworms on greenhouse gas emissions during vermicomposting of sewage sludge. *Bioresource Technology* 268: 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.004>
- Marschner P. y Z. Rengel. 2012. Nutrient Availability in Soils. *ScienceDirect*. 315-330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123849052000121>
- Mommer, L. y M. Weemstra. 2012. The role of roots in the resource economics spectrum. *New Phytologist* 195:(4) 725–727.
- Mora Reyes J. A. 2004. El problema de la basura en la ciudad de México. Fundación de estudios urbanos y metropolitanos Adolfo Christlieb Ibarrola. [http://www.paot.org.mx/contenidos/paot\\_docs/pdf/basura\\_df.pdf](http://www.paot.org.mx/contenidos/paot_docs/pdf/basura_df.pdf)
- Morel J.L., C. Chenu, K. Lorenz. 2015. Ecosystems services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas (SUITMAS). *Soils and Sediments in Urban and Mining Areas*. 15: (8) 1659-1666. <https://nph-onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/full/10.1111/j.14698137.2012.04247.x?sid=EBSCO%3Aedsjsr>

- Naeem, S. y J.P. Wright. 2003. Disentangling biodiversity effects on ecosystem functioning: deriving solutions to a seemingly insurmountable problem. *Ecology Letters* 6: 567–579.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Diario oficial de los Estados Unidos Mexicanos, México, 31 de diciembre del 2002. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Nurul-Nasyitah S., H. Abdul-Hamind, A. Abdu y I. Mohd-Kamil. 2015. Effects of soil compaction on growth and physiological characteristics of *Azadirachta excelsa* seedlings. *American Journal of plant physiology* 10: (1) 25-42. <http://dspace.fudutsinma.edu.ng/jspui/bitstream/123456789/398/1/25-42.pdf>
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2000. Annual Review, Nairobi, Kenia. 17-25.
- Prieto I., C. Roumet, R Cardinael, C. Dupraz, C. Jourdan, J. H. Kim., J. Luc Maeght, Z. Mao, A. Pierret, N. Portillo, O. Roupsard, C. Thammahacksa y A. Stokes. 2015. Root functional parameters along a land-use gradient: evidence of a community-level economics spectrum. *British Ecological Society* 103: 361-373 <https://besjournals-onlinelibrary-wileycom.pbidi.unam.mx:2443/doi/full/10.1111/1365-2745.12351?sid=EBSCO%3Aedsagr>
- Quinto A y L. Cárdenas. 2017. Diálogo para ganar: interacción simbiótica entre una bacteria del suelo y el frijol. *Biotecnología*. Volumen 14: 273-280.
- Reich P. B. 2014. The world-wide 'fast–slow' plant economics spectrum: a traits manifestó. *Journal of Ecology* 102: (2) 275-301. <https://besjournals-onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/full/10.1111/1365-2745.12211?sid=EBSCO%3Aedsjsr>
- Rokia, S., G. Sére, C. Schwartz, M. Deeb, F. Fournier, T. Nehls, O. Damas y L. Vidal. 2014. Modelling agronomic properties of technosols constructed with urban wastes. *Waste Management* 34: (11) 2155-2162.
- Rossiter, D. G. 2007. "Classification of urban and industrial soils in the world referente base for soil resources, *Journal of Soils Sediments* 7: 96-100.

- Ryser, P. 1996. The Importance of tissue density for growth and life span of leaves and roots: A comparison of five ecologically contrasting grasses. *Functional Ecology* 10: (6), 717-723.
- Salgado-Negret, B. y H. Paz. 2016. Escalando de los rasgos funcionales a procesos poblacionales, comunitarios y ecosistémicos. Pp.12- 35 En: Salgado-Negret B. (Editor). *La Ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogota, D.C. Colombia. 236 pp.
- Santos, E. S. 2019. Rehabilitation of mining areas through integrated biotechnological approach: Technosols derived from organic/inorganic wastes and autochthonous plant development. *Science Direct* 224: 765-775. <https://www.sciencedirect.com/pii/S0045653519303960?via%3Dihub#bib20>
- Schaczynski, J. 2010. Biochar and Sustainable Agriculture. pp.1-12. En: Michels H. (editor). *National Sustainable Agriculture Information Service* [www.attra.ncar.org/attra-pub/biochr.html](http://www.attra.ncar.org/attra-pub/biochr.html) or [www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/biochar.pdf](http://www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/biochar.pdf).
- Siebe C., R. Jahn y K. Stahr. 2016. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial N° 4. Chapingo, México. 57 pp.
- Sohi, S., E. Lopez-Capel, E. Krull y R. Bol. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO land and water science report 05/09:64. <http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf>
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez-Capel, y R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances Agronomy*, 105: 47-82.
- Sombroek, W.G., F.O. Nachtergaele, A. Hebel. 1993. Amounts, dynamics and sequestrations of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426.
- Stroganova MN y M.G. Agarkova. 1993. Urban soils: experimental study and classification (exemplified by the soils of southwestern Moscow). *Eurasian Soil Science*, 25: (3) 59-69.

- Sztern, D. y M.A. Pravia. 1999. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 69 pp.
- Tjoelker, M. G., J. M. Craine, D. Wedin, P. B. Reich y D. Tilman. 2005. Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. New Phytologist Foundation. Journal Plant Nutrition and Soil Science 162: (5) 539–548. <https://nph-onlinelibrary-wiley-com.pbidi.unam.mx:2443/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2005.01428.x?sid=EBSCO%3Aedsjsr>
- Thompson, M.L., R.F Troeh. 2002. Los suelos y su fertilidad. Cuarta edición reimpressa. Editorial Reverte. México. 661 pp.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. World Urbanization Prospects: the 2014 Revision. Nueva York. E.U.A. 493 pp.
- Valverde, T., J.A. Meave, J. Carabias y Z. Cano-Santana. 2005. Ecología y medio ambiente. Person educación, México. ISBN: 970-26-0536-9. 124-128 pp.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph y A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil. 327: 235-246.
- Vázquez-Solís, G. 2018. Rasgos funcionales del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) como indicadores potenciales de la calidad de suelo en agrecosistemas de Guanajuato. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 91 pp.
- Vidal-Barahona A., L.C. Lagunes-Espinoza, E. Valadez y C.F. Ortiz-García. 2006. Variabilidad morfológica y molecular de cultivares criollos y mejorados de frijol común en Tabasco, México. Revista Fitotecnia Mexicana 29: 273-281.
- Violle, C., M.L Navas, D. Vile, E. Kazakou, C. Fortunel, I. Hummel y E. Garnier. 2007. Let the concept of trait be functional. Oikos 116: 882– 892.
- Wesley, Liam R. 2014. Clayas and Clays minerals. Geological origin, mechanical properties and industrial applications. Earth sciences in the 21st century. Editorial Nova Science Publishers, Inc. New York. E.U.A. 297-334 pp.
- Wilcke W, J. Lilienfein, S.D.C Lima y W. Zech. 1999. Contamination of highly weathered urban soils in Urblandia, Brazil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 162: 539-548.

- WRB (1999): Base Refrencial Mundail del Recurso Suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Sociedad internacional de la ciencia del suelo, centro internacional de referencia e información en suelos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.89.
- Wright, I.J., P.B Reich, M. Westoby, D.D. Ackerly, Z. Baruch, F. Bongers, *et al.* 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821– 827.
- Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro y S. Koala. 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Field Crops Research*, 75: 53-62.
- Yang Z, W. Lu, Y. Long. X. Bao y Q. Yang. 2011. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. *Journal of Geochemistry Explorer*, 108: 27–38.
- Young I.M., J.W. Young, N. Crawford, W. Nunan y A. Otten. 2008. Spiers Microbial distribution in soils: physics and scaling *Advancs in Agronomy*, 100: 81-121.
- Zhang G.L. 2005. Ecological services of urban soils in relation to urban ecosystem and environmental quality. *Scientifical Technical Review*. 25:(3) 16–19.

## **X. Anexos**

### Anexo 1

El análisis de metales pesados está conformado por las fracciones soluble, oxidable, reducible e inerte, la suma de estas fracciones proporciona la concentración total de los metales pesados en los diferentes residuos. La fracción soluble es aquella fracción que puede movilizarse a través de la solución del suelo y ser absorbida por la planta, pudiendo ser tóxica a concentraciones elevadas. La forma oxidable de los metales pesados es la que está ligada a la materia orgánica del suelo y sulfuros, los cuales bajo condiciones oxidantes pueden movilizarse. La fracción reducible es aquella ligada a los óxidos de Fe y Mn, es una fracción estable, pero puede movilizarse bajo condiciones reductoras. La fracción inerte o residual corresponde a la fracción asociada a minerales no silicatados, es muy estable ya que se puede movilizarse solo en condiciones de altas temperaturas o ataque muy ácido.

El análisis de metales pesados totales para los residuos individuales se muestra en el Cuadro 26. Se puede observar que la composta elaborada en la Planta de composta de la Ciudad de México posee niveles de cobre y cinc (111.7 y 233 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente), por encima de los niveles permitidos por la Environment Protection Agency de los Estados Unidos (EPA, 2007), que es la Agencia de Protección Ambiental de los Estado Unidos, encargada de la proteger la salud humana y del ambiente: aire, agua y suelo.

Cuadro 25. Fraccionamiento de metales pesados en los residuos individuales que se emplearon para elaborar los suelos artificiales.

<i>Residuos</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>
	<i>Mg kg<sup>-1</sup></i>							
Excavación	2.1	1.5	7.9	15.6	10.1	15.9	6.1	40.9
Construcción	0.0	1.8	5.6	16.0	76.2	17.1	20.0	68.4
Composta CDMX	2.0	2.0	4.3	42.9	111.7	22.1	0.0	233.9
Lombricomposta	2.0	1.0	2.7	34.6	24.1	12.3	4.5	120.4
Madera	3.0	0.5	0.1	0.0	8.8	3.5	0.0	43.2
Límites máximos permisibles establecidos en la NOM 147 (2004) EPA (2007)	22	37	250	280	100	1600	400	200

*As: Es un metaloide, pero se incluye en esta tabla por el daño que puede ocasionar a la salud.*

## Anexo 2

En el Cuadro 26 se observa que los tratamientos que tuvieron una densidad aparente baja fueron los tratamientos 3, 6 y 7, el primero contenía en su composición biocarbón (residuo ligero), y los dos últimos carecían de materiales de construcción y excavación. En contraste los valores más altos se presentaron en los tratamientos 2, 4 y 5, el tratamiento 2 se mezcló con residuos de excavación y los tratamientos 4 y 5 con residuos de construcción, ambos materiales pesados. El tratamiento 1 presentó un valor intermedio. La densidad real de los tratamientos 1 a 5 fue alta ya que reflejó la mezcla con residuos de construcción y excavación, por el contrario, los tratamientos 6 y 7 que carecen de estos materiales y son más ligeros.

El menor porcentaje de porosidad se presentó en los tratamientos 4 y 5, ambos tratamientos tenían en común residuos de construcción, dentro de este grupo, pero con una porosidad un poco mayor, estuvieron los tratamientos 1 y 2 que contenían residuos de excavación. Los tratamientos 6 y 7, que carecen de residuos de excavación y construcción conformaron el segundo grupo de suelos más porosos. El tratamiento 3 contiene residuos de excavación además de un aporte importante de biocarbón (45%), que influyó para que este tratamiento alcanzara el mayor porcentaje de porosidad. Estos resultados son inversamente proporcionales a los valores de densidad (particularmente para los tratamientos 3, 6 y 7), a menor densidad aparente, mayor es el porcentaje de porosidad. En cuanto a los valores de pH (Cuadro 26), los tratamientos 2, 5 y 7 presentaron valores que fluctuaron entre muy ligeramente a ligeramente alcalinos, los tres tratamientos tienen en común que carecen de biocarbón. En contraparte, los tratamientos 1, 3, 4 y 6, presentaron pH moderado a fuertemente alcalinos, estos tratamientos contenían en su composición biocarbón.

En lo que respecta a la conductividad eléctrica, los valores de los tratamientos 6 y 7, fueron muy bajos y no restringieron el desarrollo de ningún cultivo. En el resto de los tratamientos la conductividad eléctrica es baja y puede llegar a afectar el desarrollo de cultivos sensibles (Cuadro 26).

Cuadro 26. Propiedades físicas y químicas de los 7 tratamientos.

<i>Tratamiento</i>	<i>DA</i> <i>g cm<sup>-3</sup></i>	<i>DR</i> <i>g cm<sup>-3</sup></i>	<i>Porosidad</i> <i>%</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i> <i>mS cm<sup>-1</sup></i>
1	0.66	2.15	69.1	8.3	1.37
2	0.79	2.42	67.3	7.4	1.52
3	0.54	2.10	74.2	8.7	1.32
4	0.79	2.07	61.9	8.4	1.17
5	0.79	2.31	65.7	7.8	1.11
6	0.50	1.85	73.2	8.1	1.07
7	0.53	2.00	73.3	7.4	0.87

(Da): densidad aparente; (Dr): densidad real; (CE): conductividad eléctrica.

Se realizaron análisis de carbono orgánico total (C), nitrógeno orgánico total (N), fósforo disponible (P) y de bases intercambiables K, Ca y Mg presentes en los 7 tratamientos puesto que son nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas (Cuadro 27). Bajas concentraciones de carbono se presentaron en los tratamientos 2 y 5, de nitrógeno y calcio en el tratamiento 3, de fósforo en el tratamiento 4, el potasio fue bajo en los tratamientos 6 y 7 y el magnesio y sodio en el tratamiento 5. En contraparte, los Tecnosoles con mayores concentraciones de carbono, nitrógeno, calcio y potasio, fueron los tratamientos 4 y 6 (ambos contenían composta y biocarbón), mayores concentraciones de fósforo y sodio se presentaron en el tratamiento 2 y de magnesio en los tratamientos 6 y 7.

Cuadro 27. Elementos totales contenidos en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	C kg m <sup>-2</sup>	N kg m <sup>-2</sup>	P kg m <sup>-2</sup>	K mol <sub>c</sub> m <sup>-2</sup>	Ca mol <sub>c</sub> m <sup>-2</sup>	Mg cmol <sub>c</sub> kg	Na cmol <sub>c</sub> kg
1	34.4	1.7	0.68	2.2	9.4	2.4	1.11
2	22.9	1.8	0.93	3.1	12.3	2.8	6.08
3	35.5	0.9	0.69	3.6	7.5	1.8	0.94
4	53.1	2.7	0.61	3.7	13.0	2.4	0.86
5	23.2	1.7	0.78	2.2	13.7	1.5	0.39
6	52.7	3.2	0.66	1.8	8.8	3.2	1.82
7	40.1	2.6	0.65	1.8	10.1	3.2	0.41

### Anexo 3

Se hizo un seguimiento del crecimiento de la altura en los 7 tratamientos. En la Figura 25 se muestra el promedio y error estándar (incluyendo la variación aportada por los 4 bloques) obtenidos para cada tratamiento en las cuatro mediciones realizadas. En la gráfica se puede observar que los tratamientos comenzaron a diferenciarse a partir de la segunda medición. En la tercera medición las diferencias cambian y se acentúan definitivamente. Al final del cultivo se pueden diferenciar 2 grupos en todas las variables. Uno está conformado por el tratamiento 3 que obtuvo los valores más bajos y es consistente en todas las mediciones. El segundo grupo está conformado por el resto de los tratamientos. Destacaron los tratamientos 7 y 5 (tratamientos que contenían lombricomposta en su composición), pues presentaron los valores más altos, seguido de los tratamientos 4 y 2, con valores muy cercanos

a los primeros. Los tratamientos 6 y 1, presentaron los valores más bajos de este grupo.

En el caso de las 4 mediciones realizadas para el diámetro del tallo a partir del día de siembra, se obtuvieron resultados similares a los presentados en la variable altura de la planta. Como se observa en la Figura 25, se pueden distinguir 3 grupos al finalizar el cultivo, siendo el tratamiento 3 el primer grupo con los valores más bajos para todas las mediciones. El siguiente grupo lo conformaron los tratamientos 4 y 6 con valores favorables, aunque no tan exitosos. El tercer grupo estuvo conformado por los tratamientos 2, 5 y 7 quienes presentaron los valores más altos, todos estos tratamientos tienen en común lombricomposta en su composición. El tratamiento 1 podría entrar en el segundo grupo, a pesar de que sus valores no fueron de los más exitosos, se mantuvo por encima del tratamiento 3.

En cuanto a la cobertura de la planta, se encontró que el tratamiento 3 presentó los valores más bajos en las mediciones realizadas a los 30, 45, 60 y 80 días, al igual que en las variables de crecimiento mencionadas anteriormente. En la Figura 27 se puede observar que el tratamiento 7 presentó los valores más altos, al igual que en la variable altura. Asimismo, los tratamientos 5 y 2, mostraron resultados favorecedores al estar entre los tratamientos con crecimientos más elevados en comparación con los demás tratamientos. Los tratamientos 4 y 6 se mantuvieron por debajo de los tratamientos 5 y 2 pero de igual manera tuvieron resultados favorables. A diferencia de la variable diámetro, el tratamiento 1 mejoró sus resultados pues estuvo más alejado del tratamiento 3.

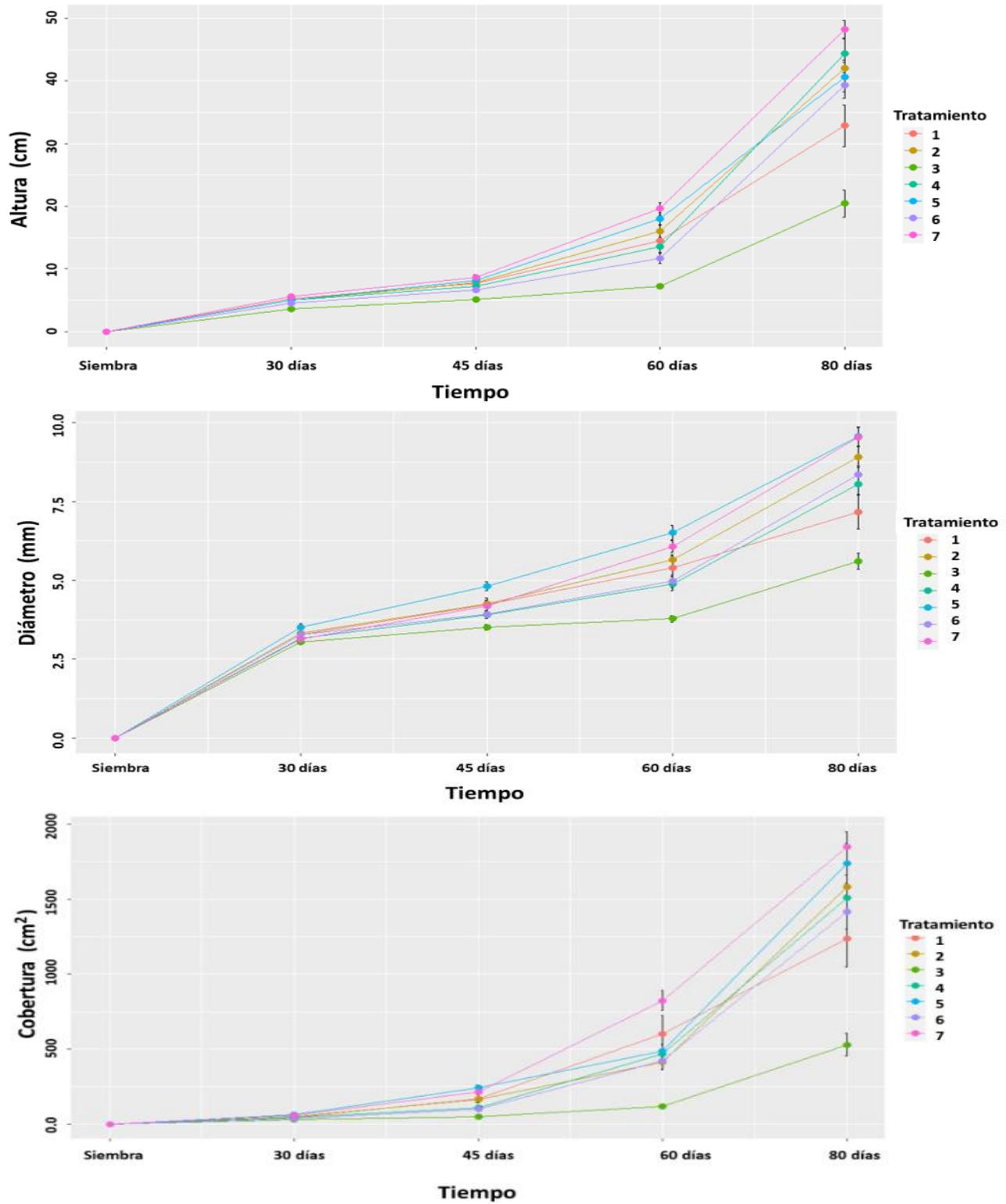


Figura 25. Comportamiento del crecimiento de A) altura, B) diámetro y C) cobertura de las plantas a lo largo de cuatro tiempos de medición después de la siembra: a los 30 días, 45 días, 60 días y a los 80 días. Se muestra el promedio y error estándar en cada una de las mediciones.

#### Anexo 4

A continuación, se muestra lo obtenido en el ANOVA del rasgo funcional contenido foliar de masa seca. Particularmente en este caso, no arrojó diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 28). Se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad transformando los datos con raíz cuadrada.

A pesar de que el análisis de varianza no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos, en la Figura 26 se puede observar el comportamiento tanto de los bloques, como de los tratamientos, de los cuales el tratamiento 1 tuvo el valor promedio más alto, mientras que el valor promedio más bajo se tuvo en el tratamiento 3 seguido del tratamiento 4. En el caso de los bloques el 1 y 2 presentaron los valores más altos (a excepción del tratamiento 1 en donde el bloque 3 tuvo el valor promedio más alto). Los valores más bajos se presentaron en el tratamiento 6, en los bloques 2 y 3.

Cuadro 28. ANOVA del rasgo funcional contenido foliar de masa seca (CFMS).

<i>Fuente</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>Valor F</i>	<i>P</i>
Tratamiento	6	2.9	0.92	0.503
Bloque	3	0.2	0.05	0.982
Residuales	18	3.1	-	

Las probabilidades significativas se encuentran en negritas.

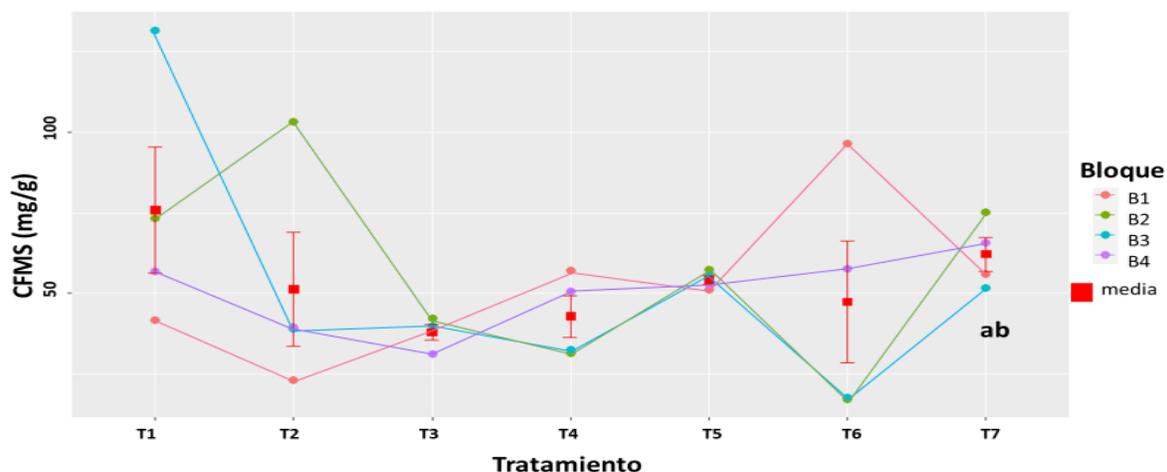


Figura 26. Modelo obtenido para el rasgo funcional CFMS. Se puede observar el valor obtenido por bloque, así como el valor promedio y error estándar por tratamiento.