



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA  
LANCIS, INSTITUTO DE ECOLOGÍA**

**Evaluación de rasgos funcionales de calabaza  
(*Cucurbita pepo* L. cv “Round Zucchini”) cultivada  
en Tecnosoles.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
BIÓLOGO**

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

**DIEGO EMILIO DÁVILA NAVARRO**



**INSTITUTO  
DE ECOLOGÍA  
UNAM**



Laboratorio  
Nacional  
de Ciencias  
de la Sostenibilidad

**DIRECTORA DE TESIS:**

**JULIETA ALEJANDRA ROSELL GARCÍA**

**LOS REYES IZTACALA, ESTADO DE MÉXICO, 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## HOJA DE DATOS DEL JURADO

### 1. Datos del alumno

Dávila

Navarro

Diego Emilio

[dav.nav96@gmail.com](mailto:dav.nav96@gmail.com)

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Biología

Tel. 55 34 54 26 89

### 2. Datos del Tutor

Rosell

García

Julieta Alejandra

### 3. Datos del Sinodal 1

Peña

Ramírez

Víctor Manuel

### 4. Datos del Sinodal 2

Vázquez

Medrano

Josefina

### 5. Datos del Sinodal 3

Gómez

Acevedo

Sandra Luz

### 6. Datos del Sinodal 4

Torres

Díaz

Alin Nadyeli

### 7. Datos del trabajo

Evaluación de rasgos funcionales de calabaza (*Cucurbita pepo* L. cv "Round Zucchini") cultivada en Tecnosoles.

92 p.

2019

## DEDICATORIA

Comienzo por dedicar el presente trabajo a mi abuela, María de Lourdes Moreno Villagómez †, con quien tuve la incomparable fortuna de criarme durante la mayor parte de mi infancia y mi adolescencia. Y recalco “fortuna”, pues estos fueron años trascendentales que dejaron una huella imborrable en mi esencia como ser humano. Quienes tuvieron el honor de conocerte en persona, sabrán bien de lo que hablo. No tengo la menor duda de que los mejores aspectos de mi persona, son tu legado. *Yuyis*, prometo llevar tus enseñanzas a lo largo de mi vida profesional, la cual comienza con el presente documento. Hasta pronto, querida *má*.

A mi madre, Alicia Esperanza Navarro Moreno, por ser sencillamente el ejemplo más grande de sacrificio, fortaleza y dedicación. Es a ti a quién debo mi historia, mi fuego interno, mis valores, mis anhelos y mi determinación. Para mí representas la bondad personificada, el amor encarnado. Eres mi confianza en el pasado, y en el futuro. Siempre estaré en deuda contigo, madre. Absolutamente todo lo que he logrado hasta el día de hoy ha sido posible gracias a tu amor, tus sacrificios, tu esfuerzo. Jamás olvidaré aquél día cuando decidí estudiar biología; fuiste la primera persona en apoyarme, y aquí está el resultado. Te lo dedico.

A mi abuelo, el ingeniero Agustín Navarro Herrera, por ser el más grande ejemplo de un profesionalista con vocación, exitoso e inigualablemente comprometido con su país. Jamás he conocido persona más culta, tenaz y apasionada; siempre inquieta por hacer, por *construir*. Querido abuelo, gracias por enseñarme que tu más grande obra no fue una autopista para comunicar personas y bienes, o una gran represa para llevar agua potable a distantes comunidades, tu *magna obra* ha sido tu familia. Abuelo, has sido mi mentor, mi cómplice, mi amigo, y por un largo tiempo *un magnífico padre*.

A mis hermanos, Santiago y Arantza, por ser mis compañeros de vida por excelencia, así como mi apoyo incondicional. No tienen idea de lo mucho que he aprendido de ustedes y de la alegría y autenticidad con las que enfrentan los retos del día a día. Son grandes, mis queridos hermanos, y sé que llegarán muy lejos.

A Rubén Anzaldúa Mercado, por haberme dado la bienvenida como parte de tu familia. A través de tu cariño, comprensión, solidaridad, paciencia y esfuerzo, me has dado todo el apoyo y las herramientas necesarias para poder enfocarme en mis estudios profesionales.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi *alma mater*, la Universidad Nacional Autónoma de México, que para mí constituye un microcosmos de nuestra Nación, por ser la Institución que me ha permitido encontrar el camino y los medios para convertirme en un profesionalista con ética, valores y, sobre todo, comprometido con dejar una huella positiva en su país. *Por mi raza hablará el espíritu.*

A la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, por la cual guardo un profundo cariño, al ser el punto de encuentro entre admirables trabajadores, comprometidos académicos, apasionados estudiantes y una memorable comunidad en general. No tengo duda de que algunos de los momentos más trascendentes en mi vida han transcurrido en sus aulas y laboratorios.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) y al Instituto de Ecología, por constituir espacios ejemplares y emblemáticos de enseñanza e investigación. Gracias por permitirme acceder a sus aulas, laboratorios y auditorios. Ha sido de las experiencias más enriquecedoras para mi formación como biólogo.

Al Proyecto DGAPA- PAPIIT IN108118 con el nombre: *Construcción y monitoreo de tecnosuelos con materiales de desecho para la revegetación urbana*, a cargo de la Dra. Blanca Lucía Prado y la Dra. Lucy Mora Palomino del Instituto de Geología (UNAM), por otorgar el financiamiento necesario para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

Al proyecto CONACyT PAPIIT-IN207819 que se titula: “Estudio teórico y práctico de la relación agricultura-biodiversidad en el contexto de la matriz agroecológica”, a cargo de la Dra. Mariana Benítez Keinrad, por el financiamiento otorgado a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

A la Dra. Julieta Alejandra Rosell García, sencillamente por ser mi principal guía a lo largo del presente trabajo y por el hecho de representar el mayor ejemplo en mi vida de una profesionalista y académica intachable, no solo en el ámbito laboral y científico, sino también en el ámbito personal. Gracias Julieta, por recordarme que ser un profesionalista de inigualable excelencia y una persona con admirable calidad humana son características perfectamente compatibles.

Al Dr. Víctor Peña Ramírez por su inigualable paciencia y por compartir, siempre con gran entusiasmo, sus amplios conocimientos en las ciencias biológicas, así como por todas las enseñanzas que me ha dejado, no solo en el ámbito académico, sino también personal. Profesor, usted es un magnífico ejemplo de un investigador apasionado, curioso y comprometido.

A los miembros del Sínodo, M. en C. Josefina Vázquez Medrano, M. en C. Alin Nadyeli Torres Díaz y Dra. Sandra Luz Gómez Acevedo, quienes en ningún momento escatimaron su valioso tiempo y sus inmejorables consejos, aportaciones, asesorías, enseñanzas y sugerencias. Estoy inmensamente agradecido con ustedes.

Al personal de la Planta de Composta de Ciudad Universitaria, UNAM, por su ardua labor, de la que fui testigo durante todas mis visitas a la Planta. Gracias por permitirme compartir ese espacio de trabajo con ustedes.

A la Dra. Amanda Moreno Rodríguez, a quien tuve el gusto de conocer durante mi primer semestre de la carrera de Biología, por su destacada labor docente, así como todas sus enseñanzas en el ámbito académico y personal durante la elaboración de mi proyecto de LICyT. Sus lecciones forman parte de la espina dorsal de mi formación como biólogo.

Al profesor Francisco López Galindo, por sus valiosos consejos y asesoría durante la construcción del proyecto de Laboratorio de Investigación Científica VII y VIII.

Al Dr. Mark Olson, por permitirme formar parte de su curso de redacción científica y por todas sus valiosas enseñanzas, así como por los buenos momentos y las risas compartidas.

A la Lic. En Ciencias de la Tierra Guadalupe Vázquez Solís, a quien considero una asombrosa amiga, porque en ella encontré una persona con una calidad humana excepcional. Lupita, gracias por enseñarme a manejar el equipo y software necesario para todos los análisis. Tienes una paciencia infinita y siempre estás dispuesta a ayudar al prójimo, eres admirable. Muchas gracias.

A Yesenia Paz Elizalde, en quién hallé una amiga excepcional. Gracias por haber sido una maravillosa compañera de equipo durante el desarrollo del proyecto. Eres una persona perseverante, dedicada, comprometida y sumamente capaz. He podido aprender muchas cosas de ti.

A mis queridos amigos del LANCIS, Noemí, Karen, Andrea, Pablo, Oscar, Ricardo. Definitivamente, hacerme amigo de personas tan talentosas y especiales, es de los tesoros más grandes que encontré en el LANCIS. ¡Gracias por los ratos tan agradables!

A la Dra. Mariana Benítez Keinrad, por haberme recibido con radiante amabilidad en el LANCIS, y por haberme presentado con la Dra. Rosell.

A la Dra. Maricarmen Salazar Ledesma por permitirnos acceder su espacio de trabajo en el laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM.

A Lucero Cabrera, por su invaluable apoyo con todas las dudas relacionadas con el uso de equipo y espacios en el laboratorio de Edafología Ambiental (así como su infinita paciencia).

A Itzel Sánchez y Corina Cantero por su invaluable ayuda durante el procesamiento de cientos de muestras de calabaza, quienes siempre mantuvieron una actitud admirable.

A mi hermano, Santiago Dávila Navarro por su apoyo durante las mediciones de los parámetros de crecimiento de cientos de plantas (sin importar la demora en la hora del almuerzo).

A todos mis compañeros de la carrera y en especial del grupo 52 (el mejor, sin duda alguna), así como a mis amigos Edgar, Byron, David (*Melox*), Fany, Jona, Manu, Oscar, Sebas, Rulo, Chikis, Yuly... y una lista interminable de nombres que desafortunadamente no cabría en este breve espacio, por tantos momentos inolvidables en las aulas, laboratorios y prácticas de campo.

A mis tíos Marcos, Jorge y Adriana, y especialmente a mi querida tía Laura (*Wawis*), por su enorme apoyo para hacer posible la impresión de la presente Tesis, así como para poder cubrir los gastos relacionados con el proceso de titulación. Gracias por permitirme compartir este logro con ustedes.

A mi padre, Héctor Antonio Dávila Couturier, por haberme dado la vida junto con mi madre, y por haber sido siempre un padre amoroso y carismático que llenó mi infancia de momentos emocionantes e inolvidables.

A mi familia materna y paterna, por constituir el pilar central de mi vida, que ha moldeado mi esencia y a quienes debo mis valores: Lulú, Gaby, Cawa, Lalo, Laura, Marcos, Mundo, Roto, Mone, Kiki, Mawi, Rubén Pix, Geri, Madeleine, Alo, Andy, Andrey, Majo, Sergio, Gaby, Abu Toño, Abu Carmelina †, Jorge, Claudia, Gera, Regina, Jorge, Adri, Jor, María, Sofi, Ale, Pablo, Ginny, Mel, Rafa, Diego, Rodri, Pablo primo, Julieta, Pablo, Pablito, Santi, Pablo papá, Lore, Josemi.

A mi hermano, Manuel Sánchez Victorica por su amistad incondicional, por sus sabios consejos y por compartir conmigo, como nadie más, el tren de la vida.

A todos los profesores, maestros y amigos que me acompañaron a lo largo de mi formación como Biólogo, ya sea por unos meses o durante años, quienes dejaron en mí más de una enseñanza trascendente y fundamental, las cuales han sido y serán herramientas imprescindibles en el futuro, especialmente a la Biol. María Antonieta Duarte Romero (*Miss Tony*), por haberme contagiado de su pasión por tan maravillosa materia. Gracias por haber creído en mí, por sus valiosas enseñanzas y por infundirme el valor de perseguir las propias metas sin temor a lo que pudiesen pensar los demás.

*“Lo que hace tan complicado organizar el ambiente de manera sensata, es que aquello que observamos y tocamos se encuentra íntimamente ligado con todo lo demás.”*

**Isaac Asimov**

*“The clearest way into the Universe, is through a forest wilderness.”*

**John Muir**

*“La observación y la experimentación no bastan para generar conceptos biológicos, siendo la biología una construcción racional.”*

**Ismael Ledesma Mateos**



## Contenido

1.	Introducción .....	14
1.1	La extracción de suelo de origen natural .....	14
1.2	Los suelos artificiales como alternativa para la extracción de suelo de zonas forestales.....	15
1.3	El concepto de calidad de suelo y sus variables indicadoras .....	17
1.4	La ecología de rasgos funcionales como enfoque para la evaluación de Tecnosoles.....	19
1.5	La calabaza como sistema de estudio: un componente central de los sistemas de cultivo tradicionales .....	21
2.	Objetivos.....	23
2.1	General:.....	23
2.2	Particulares: .....	23
3.	Hipótesis .....	24
4.	Materiales y Métodos.....	25
4.1	Diseño experimental y montaje de tratamientos .....	25
4.2	Análisis Físicos, Químicos y Fisicoquímicos del Suelo .....	28
4.3	Germinación de semillas .....	28
4.4	Porcentaje de germinación. ....	28
4.5	Rasgos funcionales (siguiente página) .....	28
4.5.1	Medición de rasgos funcionales.....	29
4.5.2	Variables relacionadas con el crecimiento.....	30
4.5.3	Biomasa total .....	30
4.5.4	Rasgos funcionales foliares .....	30
4.5.4.1	Biomasa foliar .....	30
4.5.4.2	Área foliar específica (AFE) .....	31
4.5.4.3	Contenido foliar de materia seca (CFMS) .....	31
4.5.4.4	Densidad de tejido foliar (DTF) .....	31
4.5.5	Rasgos funcionales de tallo .....	32
4.5.5.1	Biomasa del tallo .....	32
4.5.5.2	Longitud del tallo .....	32
4.5.5.3	Diámetro basal del tallo.....	32
4.5.5.4	Densidad específica del tallo (DET).....	33
4.5.6	Rasgos funcionales de raíz .....	33
4.5.6.1	Biomasa de la raíz .....	33
4.5.6.2	Rasgos funcionales de raíces finas.....	33
4.5.6.3	Longitud específica de la raíz (LER).....	34
4.5.6.4	Densidad del tejido radical (DTR) .....	35
4.5.6.5	Área superficial específica de la raíz (ASE).....	35
4.5.6.6	Contenido radical de materia seca (CRMS) .....	35
4.5.7	Otros parámetros de crecimiento .....	36
4.5.7.1	Índice Vástago-Raíz.....	36
4.6	Análisis estadísticos.....	36
4.6.1	Análisis de varianza (ANDEVA) de una vía con bloques al azar. ....	36
4.6.2	Análisis de componentes de la varianza .....	36
4.6.3	Correlación entre rasgos funcionales con los parámetros físicos y químicos de suelo .....	37
4.6.4	Análisis de componentes principales (ACP) .....	37
5.	Resultados .....	37
5.1	Análisis físicos y químicos de suelo .....	37

5.2	Porcentaje de germinación .....	38
5.3	Análisis de crecimiento .....	38
5.3.1	Diámetro .....	39
5.3.2	Altura .....	39
5.3.3	Cobertura.....	40
5.3.4	Análisis de componentes de la varianza para crecimiento.....	41
5.4	Análisis de la productividad: (Biomasa total).....	42
5.5	Comparación de rasgos funcionales entre tratamientos .....	42
5.5.1	Área foliar específica (AFE) .....	42
5.5.2	Contenido foliar de materia seca (CFMS) .....	43
5.5.3	Densidad de tejido foliar (DTF) .....	43
5.5.4	Biomasa del tallo .....	44
5.5.5	Densidad específica del tallo (DET).....	44
5.5.6	Longitud específica de la raíz (LER).....	45
5.5.7	Densidad del tejido radical (DTR) .....	46
5.5.8	Área superficial específica (ASE).....	47
5.5.9	Contenido radical de materia seca (CRMS) .....	48
5.5.10	Índice vástago-raíz .....	48
5.5.11	Análisis de componentes de la varianza para rasgos funcionales .....	51
5.6	Análisis de componentes principales (ACP) .....	52
5.6.1	ACP de rasgos funcionales .....	52
5.6.2	ACP de rasgos funcionales y suelo.....	55
5.7	Análisis de correlación .....	60
5.7.1	Correlaciones que reflejan la disyuntiva en la inversión de carbono .....	60
5.7.2	Correlaciones que reflejan paralelismo entre rasgos funcionales.....	60
5.7.3	Correlaciones entre rasgos funcionales y variables edáficas.....	61
5.7.4	Correlaciones entre variables edáficas .....	62
6.	Discusión.....	66
7.1	Germinación de <i>C. pepo</i> L. cultivar “Round Zucchini” en Tecnosoles.....	66
7.2	Crecimiento de <i>C. pepo</i> en Tecnosoles .....	67
7.3	Diferencias en la expresión de rasgos funcionales en <i>C. pepo</i> cultivar “Round Zucchini” cultivada en Tecnosoles.....	70
7.3.1	Relaciones alométricas para rasgos de <i>C. pepo</i> cultivar “Round Zucchini” .....	70
7.3.2	Paralelismo en las estrategias de partes aéreas y subterráneas de <i>C. pepo</i> cultivar “Round Zucchini”	71
7.3.3	Relación entre los rasgos funcionales de hojas y raíces con variables físicas y químicas de suelo.	73
7.4	Recomendaciones para la elaboración de Tecnosoles adecuados para <i>C. pepo</i> cultivar “Round Zucchini” .....	76
7.5	Preguntas para abordar en futuros estudios .....	78
7.	Conclusiones.....	79
8.	Anexo.....	80
9.	Referencias Bibliográficas.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
Figura 1	Servicios ecosistémicos provistos por los suelos	14
Figura 2	Principales productos forestales no maderables aprovechados en México	15
Figura 3	VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS UTILIZADAS COMO INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO	18
Figura 4	Esquematización del Espectro Económico de Plantas	20
Figura 5	Milpa en la comunidad de Vicente Guerrero, Españita, Tlaxcala	22
Figura 6	Composición porcentual de los Tecnosoles empleados en el estudio	25
Figura 7	Montaje de módulos y sistema de estudio	26
Figura 8	Procesamiento de muestras para la medición de rasgos funcionales	27
Figura 9	Puntos de medición del espesor de la hoja	32
Figura 10	Esquematización de <i>C. pepo</i> que muestra la región escaneada con WinRhizo	34
Figura 11	Gráficas de medias y error estándar para rasgos funcionales	50
Figura 12	Gráficas de medias y error estándar para rasgos funcionales (continuación)	51
Figura 13	Comparación de las imágenes de raíces finas obtenidas mediante escáner	52
Figura 14	ACP para 11 rasgos funcionales	55
Figura 15	ACP para 11 rasgos funcionales y 12 variables edáficas: CP 1 y 2	58
Figura 16	ACP para 11 rasgos funcionales y 12 variables edáficas: CP 1 y 3	59
Figura 17	Matriz de correlación de Pearson para rasgos funcionales y variables edáficas	63
Figura 18	Análisis de correlación por pares de variables	64
Figura 19	Análisis de correlación por pares de variables (continuación)	65
Figura 20	Daño a las plantas ocasionado por patógenos	76
Figura 21	Etapas de reproducción sexual alcanzada por <i>C. pepo</i>	77

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Pág.
Cuadro 1	Variables indicadoras de la calidad de suelo y procesos en los que intervienen	17
Cuadro 2	Atributos utilizados como indicadores de la calidad del suelo	18
Cuadro 3	Rasgos funcionales evaluados en el estudio	29
Cuadro 4	Resultados de los análisis físicos y químicos del suelo para cada tratamiento	38
Cuadro 5	ANDEVA para el porcentaje de germinación de la calabaza	38
Cuadro 6	ANDEVA para la variable diámetro	39
Cuadro 7	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para diámetro	39
Cuadro 8	ANDEVA para la variable altura	40
Cuadro 9	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para altura	40
Cuadro 10	ANDEVA para la variable cobertura	41
Cuadro 11	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para cobertura	41
Cuadro 12	Análisis de componentes de la varianza de las tres variables de crecimiento	41
Cuadro 13	ANDEVA para la variable de biomasa total	42
Cuadro 14	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para biomasa total	42
Cuadro 15	ANDEVA para la variable AFE	43
Cuadro 16	ANDEVA para la variable CFMS	43
Cuadro 17	ANDEVA para la variable DTF	43
Cuadro 18	ANDEVA para la variable biomasa del tallo	44
Cuadro 19	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para biomasa del tallo	44
Cuadro 20	ANDEVA para la variable DET	45
Cuadro 21	ANDEVA para la variable LER	45
Cuadro 22	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para LER	46
Cuadro 23	ANDEVA para la variable DTR	46
Cuadro 24	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para DTR	46
Cuadro 25	ANDEVA para la variable ASE	47
Cuadro 26	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para ASE	47
Cuadro 27	ANDEVA para la variable CRMS	48
Cuadro 28	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para CRMS	48
Cuadro 29	ANDEVA para la variable IVR	49
Cuadro 30	Prueba <i>post-hoc</i> de Tukey para IVR	49
Cuadro 31	Análisis de componentes de la varianza: rasgos funcionales	52
Cuadro 32	Porcentaje de variación explicada por los tres primeros CP del ACP para rasgos func.	54
Cuadro 33	Cargas estandarizadas de los tres primeros CP del ACP para rasgos funcionales	54
Cuadro 34	Porcentaje de variación explicada CP de variables edáficas y rasgos funcionales	56
Cuadro 35	Cargas estandarizadas de los tres primeros CP del ACP de var. edáficas y rasgos func.	57
Cuadro 36	pH, conductividad eléctrica y densidad real de los residuos individuales	80
Cuadro 37	Nutrimientos totales de los residuos individuales empleados para los Tecnosoles	80
Cuadro 38	Valores del coeficiente de correlación para cada par de variables de suelo y rasgos funcionales	81

## RESUMEN

México enfrenta actualmente una severa problemática en torno a la pérdida y degradación de suelo. Uno de los factores que ocasionan la pérdida de suelo es la extracción de Tierra de Monte proveniente de zonas forestales. Para reducir la presión sobre éste Recurso Forestal No Maderable, han surgido innovaciones como los Tecnosoles, sustratos artificiales que buscan imitar las características de suelos naturales fértiles. Con el objetivo de evaluar la calidad y viabilidad de estos suelos artificiales para el cultivo de plantas, se utilizaron los rasgos funcionales como indicadores biológicos de la calidad del suelo. En el presente estudio, se seleccionó la calabaza *C. pepo* cultivar "Round Zucchini" como sistema de estudio debido a su importancia cultural, económica y nutrimental. Se prepararon siete Tecnosoles cuya matriz estuvo constituida por materiales de construcción y de excavación. Estos se dividieron en 3 grupos: 1) tratamientos con elevado contenido de lombricomposta sin biocarbón, 2) tratamientos con composta y biocarbón y 3) tratamientos con elevado contenido de biocarbón y sin adición de materia orgánica. Se evaluó la germinación, crecimiento y máximo desarrollo vegetativo de *C. pepo* en estos sustratos, para lo cual se midieron 15 rasgos funcionales de hojas, tallo y raíz. No se encontraron diferencias significativas en la germinación de *C. pepo* entre los diferentes tratamientos y se obtuvo un porcentaje de germinación >80%. Sin embargo, los Tecnosoles influyeron de forma significativa en las variables de crecimiento y los rasgos funcionales de raíces. También se encontraron evidencias de la existencia de espectros económicos en hojas y raíces, aunque con ausencia de paralelismo entre sí. Los rasgos funcionales de raíces resultaron indicadores adecuados para evaluar la calidad de estos suelos artificiales. Las estrategias conservativas en las raíces se asociaron con Tecnosoles de mayor calidad, mientras que estrategias adquisitivas se asociaron con Tecnosoles de menor calidad. Se concluye que las variables más importantes a considerar al momento de rediseñar y elaborar Tecnosoles para esta especie son: 1) el pH (un intervalo entre 5.5 y 6.5) 2) la adición de al menos un 45% de lombricomposta, 3) una densidad aparente menor de 0.9 g/cm<sup>3</sup> y 4) un radio C/N con un intervalo entre 10 y 15.

Palabras clave: Rasgos funcionales, Tecnosol, indicadores biológicos, raíces finas, calidad de suelo, calabaza.

## ABSTRACT

Mexico faces a severe problematic concerning soil loss and degradation. One of the leading factors behind soil loss is the direct extraction of natural soils from forests. To reduce the pressure upon this non-timber forest resource, innovations have arisen in recent years, such as constructed Tecnosols. These are artificial soils that tend to mimic physical and chemical properties of natural fertile soils. With the objective of evaluating the quality and viability of these artificial soils for growing plants, functional traits were used as biological indicators of soil quality. In this study, we selected squash (*C. pepo* L. cultivar "Round Zucchini") as study system due to its cultural, economical and nutritional importance. Seven Tecnosols were prepared, whose matrix was composed by construction and excavation wastes. These were divided in three groups: 1) treatments with a high percentage of vermicompost and without biochar, 2) treatments with green waste compost and biochar, and finally, 3) treatments with a high percentage of biochar but without added organic matter. Functional traits of leaves, stem and roots were evaluated during germination, growth and maximum vegetative development of *C. pepo* cv. "Round Zucchini". There were no differences in germination between treatments, reaching a high percentage (>80%). However, the Tecnosols showed strong effects in growth variables and fine root functional traits. Furthermore, evidence of the existence of economic spectrums in leaves and roots was found, despite in both cases there was an uncoordinated response. Root functional traits proved to be viable biological indicators for evaluating Tecnosol's quality. We conclude that the most important variables for the design and elaboration of these artificial soils include: 1) a pH between 5.5 and 6.5, 2) addition of at least 45% of vermicompost 3) reaching a bulk density below 0.9 g/cm<sup>3</sup> and 4) a Carbon/Nitrogen ratio between 10 and 15.

Key words: Functional traits, Tecnosol, biological indicators, fine roots, soil quality, squash.

## 1. Introducción

### 1.1 La extracción de suelo de origen natural

México enfrenta actualmente una severa problemática en torno a la pérdida y degradación de suelo (Bolaños-González *et al.*, 2016). Esto representa un grave riesgo para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que, junto con la atmósfera, constituye el medio en el que crecen la mayoría de las comunidades vegetales que conforman de los ecosistemas terrestres (Keesstra *et al.*, 2016) y es el medio en el que se desarrolla la mayor parte de la agricultura, por lo que su pérdida también implica un grave riesgo para la seguridad alimentaria (Bullock *et al.*, 2017; Maximilian *et al.*, 2019). Además, la pérdida de suelo acelera el cambio climático dado el papel que tiene el suelo en el almacenamiento de carbono (Maximilian *et al.*, 2019, Figura 1).



Figura 1. Servicios ecosistémicos provistos por el suelo. Fuente: (Baveye *et al.*, 2016).

Las causas de la pérdida de suelo incluyen procesos naturales como la erosión eólica e hídrica (Bolaños-González *et al.*, 2016) e incendios forestales, con la consecuente pérdida de cubierta vegetal (Muñoz-Iniestra *et al.*, 2009), y antropogénicos, como la tala clandestina, los procesos de urbanización, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas insostenibles y la extracción de suelo de zonas forestales, que puede ser tierra negra o mantillo (Drobnik, *et al.*, 2018, Pérez-Fernández *et al.*, 2018). Ésta última genera importantes impactos ambientales, ya que se extrae de los bosques (Ayala-Sierra y Valdez-Aguilar, 2008). En México, tanto la tierra negra como el mantillo se consideran Recursos Forestales no Maderables (RFNM) y ambos se agrupan bajo el nombre “Tierra de Monte” en la Norma Oficial Mexicana NOM-027-SEMARNAT-1996, que regula su aprovechamiento (DOF, 1995;

2003). Se trata del RFNM aprovechado en mayor cantidad, muy por encima de las resinas (SEMARNAT, 2002; Figura 2). De forma sorpresiva, la Ciudad de México es el principal proveedor, aportando hasta 102,467 toneladas anuales que representan más de la mitad del total nacional y que generan aproximadamente un valor de 13,114, 327 pesos mexicanos. El suelo extraído en la Ciudad de México proviene del Suelo de Conservación que rodea la zona urbana (Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008). La mayor parte de este recurso se destina a viveros como sustrato para el cultivo de plantas comerciales y como abono en jardines de zonas urbanas, por lo que resulta de suma importancia poder suplir tal demanda con sustratos alternativos (Pérez-Fernández *et al.*, 2018).

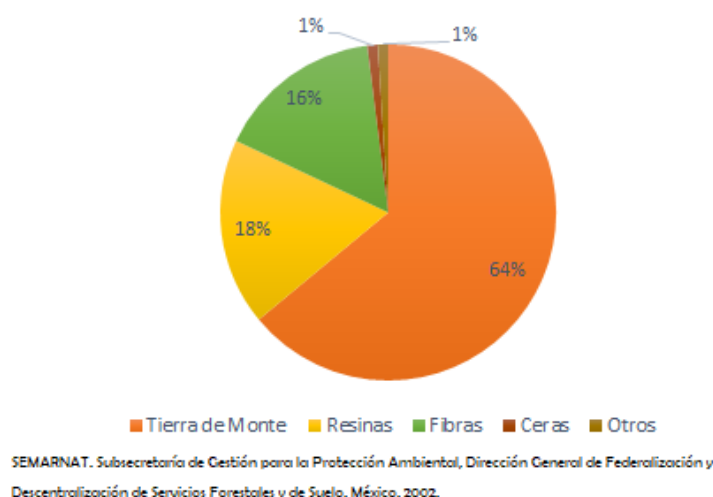


Figura 2. Principales productos forestales no maderables aprovechados en México (1997-2001). Fuente: SEMARNAT, 2002.

## 1.2 Los suelos artificiales como alternativa para la extracción de suelo de zonas forestales

Además de la utilización de Tierra de Monte para jardines y viveros urbanos, en los últimos años, su demanda ha aumentado para el desarrollo de prácticas como la agricultura urbana. Actualmente, ésta es practicada por cerca de 200 millones de personas a nivel mundial y se define como la producción, procesamiento y distribución de comida y otros productos derivados de plantas o animales que son cultivados y/o criados dentro y alrededor de las ciudades con el fin de cubrir necesidades locales (Game y Primus, 2015). Dado que se estima que para el año 2050 cerca del 68% de la población humana habitará en las ciudades, se considera que la agricultura urbana tendrá un papel importante en los esfuerzos por cubrir el incremento en la demanda de alimentos a la par de



la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero generados por el transporte de alimentos, así como también parte de los esfuerzos en torno a la seguridad alimentaria (Armanda *et al.*, 2019; Azunre *et al.*, 2019). A pesar del papel prometedor que puede jugar la agricultura urbana para la seguridad alimentaria a nivel mundial, diversos problemas y limitaciones relacionados con el conflicto de uso de suelo, la contaminación urbana y periurbana, la contaminación por metales pesados y los riesgos sanitarios, así como la presión sobre ciertos recursos naturales necesarios para su implementación, deben ser superados para que sea sostenible. Es por esto que ha surgido un nuevo concepto denominado agricultura urbana innovadora, que hace referencia a las prácticas de agricultura urbana que se apoyan en el desarrollo científico y tecnológico para superar diversos obstáculos y problemáticas (Armanda *et al.*, 2019). Una de éstas innovaciones son los Tecnosoles (Deeb *et al.*, 2016).

La clasificación WRB-FAO de suelos (2008) define a los Tecnosoles como aquellos suelos que contienen una cantidad significativa de artefactos (algo en el suelo reconociblemente manufacturado o extraído de la tierra por el ser humano), o están sellados por roca dura técnica (material duro creado por el ser humano, que tiene propiedades diferentes a la roca natural). Dentro de los Tecnosoles, se distinguen dos grupos: 1) aquellos que son el resultado indirecto de actividades humanas como rellenos sanitarios, suelos de minas, lodos, depósitos de escombros, etc. (Coussy *et al.*, 2017) y 2) mezclas elaboradas a partir de materiales antropogénicos con el objetivo de crear suelos aptos para el desarrollo de plantas. Estos últimos a menudo se denominan Tecnosoles construidos (Baize y Girard, 2008; Deeb *et al.*, 2016). La composición de los Tecnosoles Construidos puede ser diversa e incluir materiales como residuos agrícolas, residuos urbanos, materiales de construcción y residuos industriales (Deeb *et al.* 2016; Coussy *et al.*, 2017). Se ha observado que la evolución de estos suelos es muy rápida y que su comportamiento es muy similar a suelos de origen natural cuando se adiciona materia orgánica, lo que mejora significativamente sus propiedades físicas y químicas (Deeb *et al.*, 2016).

Se han realizado avances significativos en la caracterización de las propiedades físicas, químicas (Rowe *et al.*, 2006; Rokia *et al.*, 2014; Deeb *et al.*, 2016) e incluso biológicas (Haafez, 2013) de los Tecnosoles. Sin embargo, la virtualmente ilimitada posibilidad de mezclas hace necesario realizar los análisis correspondientes en cada suelo artificial con la finalidad de conocer su calidad.

### 1.3 El concepto de calidad de suelo y sus variables indicadoras

La calidad de suelo se define como la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar dentro de ciertos límites ecosistémicos naturales o manejados, para sostener la productividad animal o vegetal, mantener o incrementar la calidad del agua o del aire y ofrecer soporte para la salud y las actividades humanas (Karlen *et al.*, 1997). Esta noción de “funcionamiento” de un suelo como indicador de calidad ha sido ampliada con la visión más sistémica que ofrece el concepto de “Servicios Ecosistémicos”, puesto que la capacidad de los suelos para proveer servicios ecosistémicos está determinada por su diversidad de funciones (Pereira *et al.*, 2018). Estas funciones incluyen la circulación de agua y nutrientes, capacidad de filtración y amortiguamiento de metales pesados y compuestos orgánicos, amortiguamiento de ácidos y sustancias contaminantes, almacenamiento de carbono, la provisión de hábitat para poblaciones naturales de plantas y microorganismos y capacidad para sostener actividades agrícolas (Drobnik *et al.*, 2018). Dentro de este contexto, y en el marco de la multifuncionalidad de los suelos, los trabajos que buscan evaluar la calidad del suelo a menudo incorporan un gran número de variables que pueda aportar información sobre diferentes funciones o procesos en los que intervienen (Cuadro 1). Estas variables indicadoras se dividen en físicas, químicas y biológicas (García y Ramírez, 2012) y en su conjunto se denominan Indicadores de Calidad del Suelo (Estrada-Herrera *et al.*, 2017).

**Cuadro 1. Variables indicadoras de la calidad de suelo y procesos en los que intervienen. Fuente: Karlen *et al.* 1997.**

<b>Indicador</b>	<b>Procesos y funciones en los que interviene</b>
<b>Contenido de materia orgánica</b>	Ciclaje de nutrientes, retención de agua y pesticidas, estructura del suelo.
<b>Capacidad de infiltración</b>	Potencial de escurrimiento y lixiviación, eficiencia en el uso de agua por las plantas, erosión potencial.
<b>pH</b>	Disponibilidad de nutrientes, absorción y movilidad de pesticidas.
<b>Biomasa microbiana</b>	Actividad biológica, ciclaje de nutrientes, capacidad para degradar pesticidas.
<b>Formas de nitrógeno en el suelo</b>	Disponibilidad para las plantas, potencial de lixiviado, mineralización y tasas de inmovilización.
<b>Densidad aparente</b>	Capacidad de exploración de las raíces, espacio poroso, actividad biológica.
<b>Profundidad del horizonte orgánico</b>	Volumen de raíces, disponibilidad de agua y nutrientes.
<b>Conductividad eléctrica o salinidad</b>	Infiltración de agua, crecimiento de cultivos, estructura del suelo.
<b>Nutrientes disponibles</b>	Fertilidad.

Así mismo se han realizado trabajos en los que se proporcionan valores medios, mínimos y máximos de variables químicas relacionadas con la fertilidad (Estrada-Herrera *et al.*, 2017, Cuadro 2). La fertilidad se define como la capacidad dentro de un suelo para recibir, almacenar y transmitir energía para sostener el desarrollo de cultivos (FAO, 2019), por lo que hace referencia a algunas, si bien no todas, de sus funciones.

**Cuadro 2. Intervalo de valores de algunas variables utilizadas como indicadores de la fertilidad de un suelo.**

Indicador	Valor mínimo	Valor máximo
pH	5.0	7.0
Materia orgánica (%)	2.0	6.0
P <sub>ext</sub> (ppm)	8.0	20.0
Ca (cmol/kg)	8	35
Mg (cmol/kg)	2.0	5.0
K (mg/kg)	0.2	1.0
CICE (cmol/kg)	15	40
C <sub>BM</sub> (mg/kg)	10	400

El valor máximo corresponde al valor esperado del atributo en la situación de mejor calidad de suelo, mientras que el valor mínimo corresponde al valor esperado en una situación de calidad mínima aceptable (P<sub>ext</sub>: Fósforo extraíble; CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; C<sub>BM</sub>: Carbono de la biomasa microbiana. Ca, Mg y K corresponden al valor del ion intercambiable). Fuente: Estrada-Herrera *et al.*, 2017.

Con base en la información disponible en torno a los atributos que definen el concepto de calidad de suelo, es posible construir un esquema que simplifique los indicadores de calidad esperados a lo largo de un espectro que va de menor a mayor calidad en función de la fertilidad (Figura 3).



Figura 3. Variables físicas, químicas y biológicas utilizadas como indicadores de calidad del suelo a lo largo de un gradiente de fertilidad. Elaborado a partir de Estrada-Salinas (2018), Vázquez-Solís (2018) y Estrada Herrera *et al.* (2017). CIC: Capacidad de intercambio catiónico; CE: Conductividad eléctrica. \*En general se señala que un pH entre 5.5 y 6.5 es adecuado para la mayoría de las plantas (Islam *et al.*, 1980; Fageria y Moreira, 2011).

Aunque existe una gran diversidad de indicadores edáficos de tipo físico y químico, existen pocos indicadores derivados de las plantas. Trabajos recientes han examinado la posibilidad de generar nuevas variables indicadoras de calidad de suelo de fácil medición y aplicación en campo a partir de la medición de rasgos funcionales en plantas, con resultados prometedores (Estrada-Salinas, 2018; Vázquez-Solís, 2018).

#### 1.4 La ecología de rasgos funcionales como enfoque para la evaluación de Tecnosoles

El presente trabajo propone utilizar este marco conceptual y metodológico, para evaluar la viabilidad del cultivo de plantas para consumo humano en Tecnosoles, particularmente a través de la expresión de rasgos funcionales de raíces.

La ecología de rasgos funcionales pretende sintetizar una gran cantidad de información biológica, obtenida a partir de experimentos ecofisiológicos, así como de enfoques de ecología comparada a partir de datos obtenidos en campo con numerosas especies, con el objetivo de encontrar patrones generales de variación ecológica y comprender sus bases (Westoby *et al.*, 2002). Los rasgos funcionales pueden definirse como “el conjunto de rasgos morfológicos, fisiológicos y fenológicos que tienen un impacto directo en la adecuación (fitness) de un organismo, repercutiendo en su crecimiento, supervivencia y reproducción” (Violle *et al.*, 2007). Los rasgos funcionales son aquellos que interactúan directamente con el ambiente, por lo que corresponden a la dimensión de la biodiversidad que más afecta el funcionamiento de los ecosistemas, en comparación con la diversidad de especies, por lo que tienen un impacto directo en los servicios ecosistémicos (Van Bodegom *et al.*, 2015; Wood *et al.*, 2015).

Los antecedentes de la ecología de rasgos funcionales se pueden rastrear hasta los trabajos de Grime (1976; 1977), quien identifica y propone al menos tres estrategias ecológicas en función del nivel de disturbio y estrés que experimentan las plantas: 1) competitiva, 2) de tolerancia al estrés y 3) ruderal. Desde ese momento, comienza a desarrollarse un nuevo marco conceptual, bajo el cual se describen patrones de variación que coinciden con un espectro caracterizado por dos extremos: por un lado, especies que presentan un rápido crecimiento, pero con estructuras efímeras, y por otro, especies que presentan un crecimiento relativamente lento con estructuras más resistentes y longevas (Poorter *et al.*, 1995; Ryser y Lambers, 1995). Recientemente se han desarrollado un gran número de trabajos que definieron este espectro a través de la medición de rasgos funcionales, primero en hojas y posteriormente en raíces (Wright *et al.*, 2004; Mommer y Weemstra, 2012).

Posteriormente, con la evidencia de paralelismo entre rasgos funcionales de órganos aéreos y subterráneos (Freschet *et al.*, 2010; Prieto *et al.* 2015; Roumet *et al.* 2016) las conclusiones comenzaron a integrarse para la descripción detallada del espectro económico en las plantas (Reich, 2014; Figura 4). Este espectro económico a nivel de toda la planta resalta dos estrategias opuestas en cuanto al manejo de recursos (esencialmente en torno a la inversión del carbono obtenido mediante la actividad fotosintética), denominadas adquisitiva y conservativa. La estrategia adquisitiva consiste en la inversión de una gran cantidad de carbono por gramo de tejido, con el objetivo de producir estructuras más resistentes y duraderas, por lo que se asocia con hábitats que presentan condiciones adversas o recursos limitados. La estrategia conservativa consiste en una inversión mínima de carbono por gramo de tejido, a través de la cual se construyen tejidos de bajo costo que resultan menos resistentes, pero con mayores capacidades para la rápida adquisición de nutrientes, por lo que se asocia con hábitats que presentan condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas, con alta disponibilidad de recursos (Mommer y Weemstra, 2012; Reich, 2014; Salgado-Negret *et al.*, 2016).

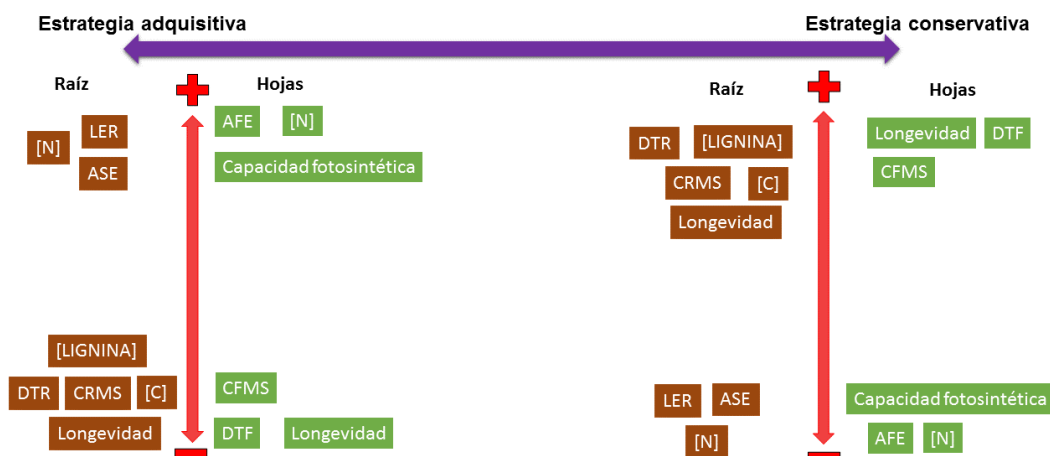


Figura 4. Esquemización del Espectro Económico de Plantas. Fuente: Mommer y Weemstra, 2012; Reich, 2014; Isaac *et al.*, 2017. AFE: Área foliar específica; [N]: Concentración de nitrógeno; CFMS: Contenido foliar de materia seca; DTF: Densidad del tejido foliar [LIGNINA]: Concentración de lignina; LER: Longitud específica de la raíz; ASE: Área superficial específica; DTR: Densidad del tejido radical; CRMS: Concentración radical de materia seca.

Los avances en la construcción del espectro económico de plantas dieron lugar a un gran número de trabajos que han evaluado la expresión de rasgos funcionales de plantas silvestres a lo largo de gradientes ambientales (Díaz *et al.*, 2016; Dalle *et al.*, 2019; Qi *et al.*, 2019), desde el nivel intraespecífico (Hajek *et al.*, 2013), a nivel de comunidad (Roumet *et al.*, 2016) y finalmente a nivel

de ecosistema bajo el marco conceptual de los servicios ecosistémicos (Bodegom y Price, 2015, Salgado-Negret *et al.*, 2016). Algunos estudios se han enfocado en gradientes de condiciones de suelo (Prieto *et al.*, 2015) mostrando que a nivel de comunidad existen marcadas diferencias en la expresión de rasgos de raíces finas a lo largo del espectro económico en función de las condiciones de suelo, especialmente en términos de fertilidad.

El enfoque de rasgos funcionales ha comenzado a aplicarse en plantas de cultivo (Isaac *et al.*, 2017) y recientemente se ha examinado su expresión con características físicas y químicas del suelo, mostrando correlaciones importantes (Estrada-Salinas, 2018; Vázquez-Solís, 2018; Pan *et al.*, 2018).

Este enfoque, además aportar conocimientos de frontera sobre la expresión de rasgos en plantas de cultivo (Martin-Robles *et al.*, 2019; Bukovsky-Reyes *et al.*, 2019), tiene el potencial para ser aplicado de forma novedosa en el estudio de sistemas agroecológicos de gran importancia cultural y alimentaria como es el caso de la milpa, y en última instancia, ofrecer nuevas herramientas para su gestión y manejo, en el marco de la sostenibilidad.

#### 1.5 La calabaza como sistema de estudio: un componente central de los sistemas de cultivo tradicionales

La milpa representa el sistema de cultivo tradicional más importante a nivel nacional. Es un sistema agrícola desarrollado en Mesoamérica que se caracteriza por ser un policultivo de tres elementos esenciales: 1) el maíz (*Zea mays* L.), el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y la calabaza (*Cucurbita* spp.) (Ebel *et al.*, 2017), además de otras plantas herbáceas anuales agrupadas como “arvenses” que incluyen a los quelites, entre muchas otras, algunas con propiedades y usos medicinales (Eguiarte *et al.*, 2017, Figura 5). En conjunto conforman un sistema agrícola excepcionalmente agrobiodiverso que integra importantes elementos socio-culturales de diferentes regiones geográficas (Zizumbo-Villareal y Colunga-García Marín, 2017). La milpa como sistema agroecológico es la antítesis del sistema de monocultivo que caracteriza a la agricultura intensiva de la Revolución Verde (Rosset y Altieri, 2018). La diversidad funcional de las especies que constituyen el sistema favorece su rendimiento en conjunto y genera resiliencia (Ebel *et al.*, 2017), por lo que actualmente constituye uno de los sistemas de estudio más interesantes en el marco de la sostenibilidad y la resiliencia frente al cambio climático (Ebel *et al.*, 2017).



Figura 5. Milpa en la comunidad de Vicente Guerrero, municipio de Españita, Tlaxcala. Se observa maíz, calabaza y frijol ayocote. Fotografía: Diego E. Dávila Navarro.

Uno de los componentes de la milpa, la calabaza, perteneciente al género *Cucurbita*, destaca por su temprana domesticación en comparación con el maíz y el frijol, remontándose al Pleistoceno tardío (Piperno y Stothert, 2003; Sánchez de la Vega, 2017). Se identifican al menos seis eventos independientes de esta domesticación (Castellanos-Morales, *et al.*, 2018) y México es considerado centro de origen, domesticación y diversidad de calabazas (Sánchez de la Vega, 2017). En el trabajo de Castellanos-Morales *et al.* (2018), se reportan 5 especies domesticadas: *C. argyrosperma*, *C. ficifolia*, *C. maxima*, *C. moschata* y *C. pepo*, que a su vez incluyen numerosas razas o variedades locales y cultivares comerciales y se han desarrollado importantes trabajos en torno a su filogenia molecular (Lira-Saade *et al.*, 2009; Sánchez de la Vega, 2018).

De las especies domesticadas del género *Cucurbita*, *Cucurbita pepo* (Linneo, 1753), también conocida como “calabacín”, tiene la mayor importancia económica, así como el mayor número de variedades y cultivares comerciales (Gong *et al.*, 2012). La especie *Cucurbita pepo* L. incluye cuatro cultivares comerciales del grupo “Zucchini”, entre los cuales destaca el cultivar “Round Zucchini”, que recibe su nombre por la forma redondeada del fruto (Figura 7 F). Sus hábitos de crecimiento son generalmente subarborescentes y suele cultivarse a cielo abierto como parte de la milpa (CONABIO, 2012; Méndez-López *et al.*, 2010). Su fruto se consume en un estado inmaduro como vegetal, y su valor nutricional es elevado, ya que contiene polisacáridos, proteínas activas, aminoácidos

esenciales, vitaminas, carotenoides y minerales. Dado que su componente principal es el agua (<90% de su peso fresco), es bajo en calorías y presenta un alto contenido de fibra (Martínez-Valdivieso, 2014). Las semillas también son un producto altamente consumido, y en México se conocen por el nombre de “pepita”. Poseen un elevado valor comercial, y de éstas se extraen aceites ricos en ácido linoleico (43-56%) y oleico (24-38%), tocoferoles beta y gamma (vitamina E) y carotenoides, que poseen efectos antioxidantes (Martínez-Valdivieso *et al.*, 2014).

La larga historia de domesticación de la calabaza en la región, su importancia cultural como componente de la milpa, así como su importancia alimentaria y económica, hacen de esta planta un excelente sistema de estudio para evaluar la calidad de los Tecnosoles y determinar cuáles son las composiciones que favorecen el crecimiento de las plantas, como parte del esfuerzo por evaluar si los Tecnosoles pueden constituir una alternativa para la extracción de suelo de origen natural. Además, el enfoque de rasgos funcionales proporcionará información novedosa sobre los patrones de expresión de estos rasgos a lo largo de un gradiente de condiciones edáficas, en una especie que ha sido resultado de un largo proceso de domesticación. Esto permitirá contrastar los resultados obtenidos con las observaciones hechas en plantas silvestres.

## **2. Objetivos.**

### 2.1 General:

- Evaluar la calidad de siete Tecnosoles para el cultivo de la calabaza (*Cucurbita pepo* L. cultivar “Round Zucchini”) mediante el análisis de rasgos funcionales en las plantas.

### 2.2 Particulares:

- Determinar las características físicas y químicas de siete diferentes Tecnosoles.
- Comparar el porcentaje de germinación de *C. pepo* entre los diferentes Tecnosoles.
- Comparar rasgos funcionales de hojas, tallo y raíz de las plantas cultivadas entre los diferentes Tecnosoles.
- Examinar la asociación de los rasgos evaluados en las plantas con las variables físicas y químicas de los diferentes Tecnosoles.



- Examinar las relaciones entre rasgos funcionales de las plantas para determinar la existencia de asociaciones entre conjuntos de rasgos, así como patrones de expresión a lo largo de ejes de variación como el espectro económico de hojas (Wright *et al.*, 2004) y el espectro económico de raíces (Mommer y Weemstra, 2012; Priet *et al.*, 2015).
- Determinar si los Tecnosoles estudiados son adecuados para el cultivo de calabaza *C. pepo* L. cultivar "Round Zucchini".

### 3. Hipótesis

Los Tecnosoles que presenten elevados contenidos de materia orgánica, valores de pH ligeramente ácidos, (baja densidad aparente y porosidad abundantes), serán los más favorables para el crecimiento de *C. pepo* L. cultivar Round Zucchini. Esta condición más favorable será el resultado de la abundancia y disponibilidad de nutrientes y un espacio poroso adecuado para el crecimiento de las raíces, lo que se reflejará en la expresión de rasgos funcionales acordes con una estrategia adquisitiva del espectro económico de plantas. En este sentido, se espera que los tratamientos con adición de materia orgánica en forma de composta sean los más adecuados, ya que la adición de materia orgánica incrementa la fertilidad del suelo, mejorando la capacidad de retención de agua, la estructura y balanceando el radio carbono-nitrógeno.

Además, se espera encontrar evidencia de paralelismo en la expresión de rasgos funcionales de órganos aéreos y subterráneos de calabaza; en otras palabras, se espera encontrar las mismas estrategias de manejo de recursos entre hojas, tallos y raíces en función de la fertilidad de los Tecnosoles. La ausencia de paralelismo entre los diferentes órganos supondría un uso ineficiente de recursos, reduciendo el desempeño de los organismos.

Es probable que la expresión de rasgos funcionales en respuesta la diferencia de fertilidad de los Tecnosoles sea más marcada en las raíces, debido a que las condiciones físicas y químicas de suelo afectan de forma directa la morfología, producción y recambio de raíces. Debido a lo anterior se esperan correlaciones más fuertes entre los rasgos funcionales de raíz y algunas características físicas y químicas de suelo en comparación con las hojas.

## 4. Materiales y Métodos

### 4.1 Diseño experimental y montaje de tratamientos

El experimento se llevó a cabo dentro del terreno que forma parte de la Planta de Composta de Ciudad Universitaria, UNAM, Ciudad de México. Las coordenadas son 19°18'38.96" N, 99°10'37.36" O, con una altitud de 2270 msnm. Siete Tecnosoles fueron preparados previamente por el Dr. Víctor Peña del Instituto de Geología UNAM, los cuales se pueden clasificar en 3 grupos: 1) tratamientos con elevado contenido de lombricomposta sin biocarbón, 2) tratamientos con composta y biocarbón y 3) tratamientos con elevado contenido de biocarbón y sin adición de materia orgánica (Figura 6). En los 3 casos, la "matriz" principal del suelo consistió en una mezcla de residuos de excavación, residuos de construcción y trozos de madera, en diferentes proporciones. El diseño experimental consistió en un diseño de bloques completos al azar. Los tratamientos fueron colocados en módulos rectangulares de 1.45 m de largo, 1.45 m de ancho y 0.4 m de profundidad agrupados en cuatro bloques, cuya implementación responde a un gradiente de iluminación en el sitio donde se instalaron los módulos, pues el terreno se localizaba a un costado de un cantil de basalto de aproximadamente 8 metros de altura (Figura 7 B).

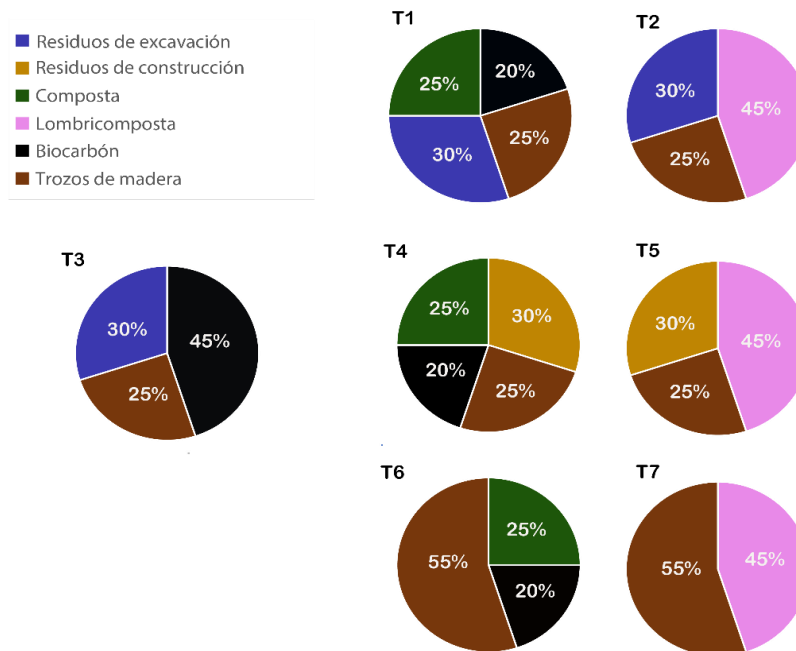


Figura 6. Composición porcentual de los diferentes residuos orgánicos y de construcción que se mezclaron para elaborar los siete Tecnosoles del estudio.



Figura 7. A) Módulos que contienen los Tecnosoles agrupados en bloques. B) Vista superior de los módulos. C) Siembra de semillas de *C. pepo*. D) Semillas de *C. pepo*. E) Plantas de *C. pepo* y su distribución en los módulos. F) Cultivar "Round Zucchini" de *C. pepo* con su característica forma de crecimiento erecta subarborescente.



Figura 8. G) Extracción de raíces de *C. pepo* H) Medición del grosor de una hoja de *C. pepo* con un vernier digital. I) Pesado de muestras frescas utilizando una balanza analítica. J) Escaneo de raíces finas de *C. pepo*. K) Imágenes digitalizadas de las raíces finas de un individuo de *C. pepo*. L) Planta de Composta de Ciudad Universitaria, UNAM.

#### 4.2 Análisis Físicos, Químicos y Físicoquímicos del Suelo

Para la caracterización de los tratamientos, se midieron 3 variables físicas (densidad real, densidad aparente, porosidad total), 7 variables químicas de suelo (carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio; Tabla 4) y 2 variables fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica). La toma de muestras para el análisis se realizó de forma previa a la siembra de las semillas de *C. pepo* L. cv. "Round zucchini". Estos análisis se realizaron en el laboratorio de Edafología Ambiental, Instituto de Geología, UNAM. También se caracterizaron las propiedades químicas de los materiales empleados para la elaboración de los Tecnosoles (Anexo, Cuadros 36 y 37).

#### 4.3 Germinación de semillas

Se compró un lote de 900 semillas de *Cucurbita pepo* L. con comerciantes de Xochimilco, Ciudad de México, que fueron sembradas de manera directa en los 35 módulos, colocando las semillas en 5 filas con una separación de 30 cm entre cada una (25 semillas por módulo; Figura 7 C) para evitar competencia entre los individuos. Se sembraron a una distancia de no más de 1 cm de la superficie. En total se sembraron 875 semillas.

A partir de la aparición de la primera plántula sobre la superficie del suelo, se contabilizó la germinación (que en este caso se define como la aparición de los cotiledones sobre la superficie del suelo). El conteo de plántulas se realizó cada 2 días hasta que no se tuvieron nuevos registros en al menos dos conteos consecutivos.

#### 4.4 Porcentaje de germinación.

El porcentaje de germinación se obtuvo dividiendo el número de semillas que germinaron en cada módulo entre el total de semillas sembradas (25 por módulo). Posteriormente se obtuvo la media por tratamiento.

#### 4.5 Rasgos funcionales (siguiente página)

**Cuadro 3. Rasgos funcionales evaluados en el estudio**

Órgano	Nombre del rasgo y abreviatura	Definición	Referencias
Parte aérea	Cobertura	Es el área o superficie proyectada por las partes aéreas de la planta sobre la superficie del suelo.	Pedroza-Sandoval, 2016
Hoja	Biomasa foliar	Cantidad de materia orgánica en las hojas.	Fonseca <i>et al.</i> , 2009
Hoja	Espesor foliar	Grosor de la hoja.	Westoby <i>et al.</i> , 1999; Shipley y Vu, 2002
Hoja	Área Foliar Específica (AFE)	Cociente entre el área foliar y la biomasa invertida en producirla.	Shipley y Vu, 2002; Hendrik <i>et al.</i> , 2009
Hoja	Contenido foliar de materia seca (CFMS)	Proporción de la biomasa seca respecto a la biomasa fresca.	Shipley y Vu, 2002; Fort <i>et al.</i> , 2013
Tallo	Biomasa del tallo	Cantidad de materia orgánica en el tallo.	Fonseca <i>et al.</i> , 2009
Tallo	Altura	Distancia desde la base hasta el ápice de la planta.	Pedroza-Sandoval, 2016
Tallo	Diámetro basal	Diámetro basal del tallo.	Pedroza-Sandoval, 2016
Tallo	Densidad específica del tallo (DET)	Cantidad de biomasa por unidad de volumen.	Salgado-Negret, 2016
Raíz	Biomasa de la raíz.	Cantidad de materia orgánica en la muestra de raíces.	Fonseca <i>et al.</i> , 2009
Raíz	Longitud específica de la raíz (LER).	Cociente de la longitud de la raíz y la biomasa invertida en producirla. Relación entre la masa invertida por la planta por longitud de raíz.	Ostonen <i>et al.</i> , 2007 Mommer y Weemstra, 2012
Raíz	Densidad del tejido radical (DTR)	Cantidad de biomasa por unidad de volumen.	Birouste <i>et al.</i> , 2014
Raíz	Área superficial específica de la raíz (ASE).	Cociente entre área que ocupan las raíces finas y su peso seco.	Himmelbauer, 2004 Comas <i>et al.</i> , 2013
Raíz	Contenido radical de materia seca (CRMS).	Proporción de la biomasa seca respecto a la biomasa fresca. Es el equivalente del CFMS en hojas.	Shipley y Vu, 2002 Salgado-Negret, 2016
Otro	Índice Vástago-Raíz (IVR).	Cociente entre el peso seco de la raíz y el peso seco del vástago.	Martínez <i>et al.</i> , 2013 Hernández-Correa, 2015 Castro-González, 2015

#### 4.5.1 Medición de rasgos funcionales

Se seleccionaron 5 individuos por módulo de forma aleatoria con la finalidad de obtener los rasgos funcionales. Para su extracción, se cavó un cepellón de aproximadamente 30 cm de ancho por 20 cm de profundidad para obtener la mayor cantidad de raíces (Figura 8 G). A continuación, se retiró manualmente el exceso de suelo de la raíz y se sometió a un proceso de lavado con agua corriente. El resto de la planta (hojas y tallos) se etiquetó y almacenó en bolsas de plástico para su procesamiento en el laboratorio. Se evaluaron 15 rasgos funcionales (ver Cuadro 3), de los cuales 5 corresponden a las hojas, 4 al tallo y 5 a la raíz, así como el IVR que integra el vástago y raíz.

#### 4.5.2 Variables relacionadas con el crecimiento

Para la evaluación del crecimiento de las plantas, se midieron 3 variables a los dos meses desde la siembra (59 días desde la siembra), cuando las plantas se encontraban próximas a alcanzar su máximo desarrollo vegetativo (momento previo a la aparición de estructuras reproductivas). Las variables consistieron en: diámetro de la base del tallo, altura del vástago y cobertura vegetal (Pedroza-Sandoval, 2016). En el caso de la cobertura se tomaron dos medidas perpendiculares para obtener el área de una elipse:

$$A = (r^1)(r^2) \cdot \pi$$

Donde:

r<sub>1</sub>: radio 1

r<sub>2</sub>: radio 2

#### 4.5.3 Biomasa total

La biomasa refleja la cantidad de materia orgánica contenida en un organismo y a menudo es utilizada como una medida de productividad en la agricultura (Furbank *et al.*, 2019). Los valores de biomasa se obtuvieron sumando los valores de biomasa foliar, biomasa del tallo y biomasa del sistema radical. En todos los casos, las partes de las plantas se colocaron en bolsas de papel estraza debidamente etiquetadas para su secado en un horno a una temperatura de 60°C hasta alcanzar valores de peso constante (aproximadamente por 3 días). Una vez secas, las muestras se pesaron con una balanza analítica A&D Newton EJ Series (Figura 8 I).

#### 4.5.4 Rasgos funcionales foliares

Para todos los rasgos funcionales foliares (a excepción de la biomasa foliar) se seleccionaron 3 hojas maduras y sanas por individuo; se descartaron las hojas más basales por la senescencia, así como las más apicales por el estadio temprano de desarrollo.

##### 4.5.4.1 Biomasa foliar

Se obtuvieron los valores de peso seco de todas las hojas por individuo. Posteriormente se obtuvieron medias por tratamiento.

#### 4.5.4.2 Área foliar específica (AFE)

El AFE corresponde al cociente entre el área y la masa seca de la hoja y refleja la inversión de carbono por unidad de área foliar (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Las hojas fueron escaneadas utilizando el software WinFolia acoplado a un escáner (Reagent Instruments Inc., 2015) con lo cual se obtuvieron los valores de área foliar. Se obtuvo el peso seco de las hojas, y una vez registrado, el AFE se obtuvo dividiendo el área foliar entre la masa seca foliar:

$$\frac{\text{Área foliar (cm}^2\text{)}}{\text{Masa seca foliar (g)}}$$

#### 4.5.4.3 Contenido foliar de materia seca (CFMS)

El CFMS consiste en la proporción de biomasa por masa fresca de tejido foliar y generalmente los valores bajos se asocian a ambientes ricos con alta disponibilidad de nutrientes (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret *et al.*, 2016). Se ha identificado una correlación positiva entre el CFMS y la DTF (Fort *et al.*, 2013). Para la estimación del CFMS se dividió el peso seco de las 3 hojas utilizadas para el espesor, entre su peso fresco, obteniendo un valor medio por individuo:

$$\frac{\text{Masa seca foliar (mg)}}{\text{Masa fresca foliar (g)}}$$

#### 4.5.4.4 Densidad de tejido foliar (DTF)

La DTF hace referencia a la cantidad de materia por unidad de volumen y muestra una relación positiva con el CFMS (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Fort *et al.*, 2013). La estimación de la densidad de tejido foliar se hizo a partir de la división de la masa seca entre el volumen fresco de la hoja:

$$\frac{\text{Masa seca foliar (g)}}{\text{Volumen fresco foliar (cm}^3\text{)}}$$

Para esto, el volumen se obtuvo mediante la multiplicación del área foliar (obtenida con el escáner) por el espesor medio de la hoja. El espesor se obtuvo tomando 3 medidas con un vernier digital, dividiendo la hoja en 2 ejes, tomando una medida en los vértices laterales (A y B, Figura 9) y otra en el apical (C, Figura 9). Se obtuvo un valor promedio por hoja, y una gran media por individuo.



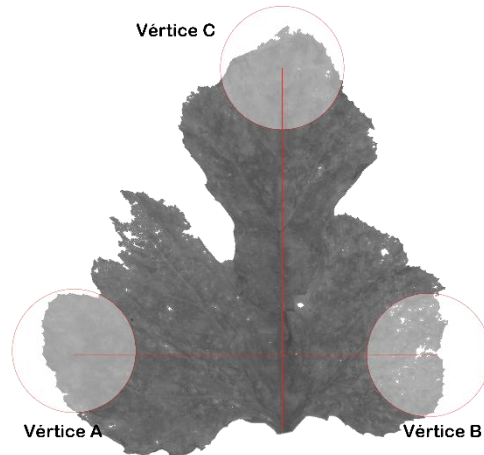


Figura 9. Puntos de medición del espesor de la hoja

#### 4.5.5 Rasgos funcionales de tallo

##### 4.5.5.1 Biomasa del tallo

La biomasa del tallo (g) se obtuvo a partir de las muestras secadas en el horno a 60° C hasta alcanzar valores de peso constante (aproximadamente 3 días).

##### 4.5.5.2 Longitud del tallo

La longitud del tallo se puede interpretar como la altura máxima alcanzada por las plantas, y se asocia con la forma de crecimiento, competencia por luz y vigor competitivo (Salgado-Negret *et al.*, 2016). La longitud del tallo (cm) se midió durante el procesamiento de muestras, utilizando una cinta métrica, partiendo desde la base del tallo hasta el meristemo apical caulinar.

##### 4.5.5.3 Diámetro basal del tallo

El diámetro basal del tallo proporciona una estimación acerca del costo asociado a elevar órganos sobre la superficie del suelo (Estrada-Salinas, 2018). Presenta una fuerte correlación con la altura y proporciona una estimación sobre la asignación de recursos a los órganos aéreos, porque se ha observado que covaría con la biomasa aérea de las plantas (Brown *et al.*, 1976; Meng *et al.*, 2017). El valor de diámetro del tallo (mm) se obtuvo al inicio del procesamiento de muestras. Utilizando un vernier digital se midió la base del tallo justo por encima de la región de la corona de la raíz (Figura, 10).

#### 4.5.5.4 Densidad específica del tallo (DET)

La DET corresponde a la división de la masa seca entre volumen fresco. Éste rasgo se relaciona con la estabilidad estructural, hidráulica y defensa, así como el potencial de crecimiento de las plantas (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Se obtuvo un segmento de 2 cm de longitud de la zona basal del tallo y se midió el volumen por el método de desplazamiento de agua, utilizando una balanza analítica (Salgado-Negret *et al.*, 2016). A continuación, las muestras se secaron en un horno a 60°C hasta alcanzar valores de peso constante. Con el valor de peso seco, se obtuvo el valor de densidad mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

m = masa (peso seco en g de la muestra de tallo)

v = volumen (volumen de agua desplazado en cm<sup>3</sup>)

#### 4.5.6 Rasgos funcionales de raíz

##### 4.5.6.1 Biomasa de la raíz

A diferencia del resto de los rasgos funcionales de raíz, la biomasa (g) de las raíces se obtuvo a partir de los valores de peso seco de todo el sistema radical, incluyendo raíces finas dentro y fuera de la corona, así como raíces mayores a 2mm de diámetro, con el objetivo de estimar la asignación de biomasa a todo el conjunto de tejidos subterráneos.

##### 4.5.6.2 Rasgos funcionales de raíces finas

La medición del resto de los rasgos funcionales se enfocó en las raíces finas (<2mm de diámetro; Salgado-Negret, 2016), al ser las raíces centrales en la absorción de agua y de nutrientes. Para recuperar estas raíces del sistema radical de los individuos, se rasuraron todas las raíces finas pertenecientes a la región de la corona (figura 10). Esto se hizo para que las muestras fueran comparables entre sí, debido a que la mayor densidad de raíces finas se concentraba en esa región y no se tenía la certeza de haber recuperado la totalidad de raíces finas a lo largo de toda la extensión de la raíz, sobre todo debajo de la corona.

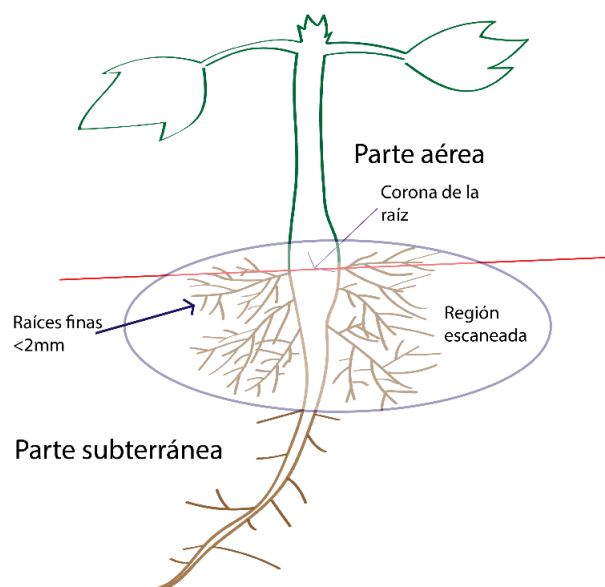


Figura 10. Esquematación de *C. pepo* que muestra la región escaneada con el software WinRhizo.

La submuestra de raíces finas se etiquetó y pesó en fresco para su posterior escaneo (Reagent Instruments Inc., 2015) y análisis con el software WinRhizo 2016 (Reagent Instruments, Montreal, Canadá). Una vez escaneadas, las raíces finas se almacenaron en una bolsa de papel aluminio etiquetada para su secado. El resto de las raíces finas recuperadas que no correspondían a la región de la corona, fueron pesadas y almacenadas en una bolsa de papel estraza etiquetada, con el objetivo de utilizarlas en el análisis de biomasa de la raíz.

#### 4.5.6.3 Longitud específica de la raíz (LER)

La LER hace referencia a la longitud alcanzada por la unidad de biomasa invertida, y depende del diámetro de las raíces y la densidad de sus tejidos (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Valores más altos de LER se han asociado con una mayor conductividad hidráulica y una mayor superficie de absorción (Salgado-Negret *et al.*, 2016). En este estudio, la LER se obtuvo a partir del análisis de las raíces finas pertenecientes a la región de la corona (figura 10), mediante el escáner (Reagent Instruments, 2015) y el software WinRhizo 2016 (Reagent Instruments, Montreal, Canadá). Se extrajo la variable de longitud de la raíz proporcionada por el software para las clases de raíces cuyo diámetro fuera de 0 a 2 mm, y se dividió entre el valor de peso seco de ese mismo conjunto de raíces finas escaneadas.

$$\frac{\text{Longitud (m)}}{\text{Peso seco raíces finas (g)}}$$

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

La DTR hace referencia a la masa seca radical por unidad de volumen en fresco. Se correlaciona positivamente con el CRMS y la concentración de lignina (Prieto *et al.*, 2015). Altos valores de DTR se asocian con estructuras más resistentes ante daños mecánicos y herbivoría, así como a una mayor longevidad (Salgado-Negret *et al.*, 2016). La DTR se calculó a partir de la división entre el peso seco del conjunto de raíces finas entre su volumen, valor obtenido mediante el análisis con el software WinRhizo.

$$\frac{\text{Masa seca radicular (g)}}{\text{Volumen fresco raíces (cm}^3\text{)}}$$

#### 4.5.6.5 Área superficial específica de la raíz (ASE)

Se refiere al área que ocupan las raíces finas por unidad de masa seca. Se trata de un rasgo muy similar al LER y refleja la relación entre la inversión de carbono por unidad de adquisición (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Salgado-Negret *et al.*, 2016). El ASE se obtuvo con el software WinRhizo, dividiendo el valor del área proyectada por las raíces finas entre su peso seco.

$$\frac{\text{Área de raíces finas (cm}^2\text{)}}{\text{Peso seco de raíces finas (g)}}$$

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

Este rasgo representa la proporción de masa seca por unidad de masa fresca de raíces finas. Presenta una correlación positiva con la densidad de tejido radical y con la concentración de lignina (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Prieto *et al.*, 2015). Altos valores de CRMS se asocian con estructuras más resistentes y longevas (Birouste *et al.*, 2014). El CRMS fue calculado a partir de la división del peso seco del conjunto de raíces finas entre el peso fresco del mismo conjunto.

$$\frac{\text{Peso seco de raíces finas (g)}}{\text{Peso fresco de las raíces finas (g)}}$$

#### 4.5.7 Otros parámetros de crecimiento

##### 4.5.7.1 Índice Vástago-Raíz

El índice vástago-raíz (IVR) es un parámetro que refleja el crecimiento de la parte aérea en su totalidad (hojas y tallo) respecto al crecimiento de la raíz (Hernández-Correa, 2015). Éste rasgo refleja la interdependencia entre ambas estructuras, ya que mientras el vástago requiere de los nutrimentos y el agua provistos por la raíz, la raíz requiere, a la vez, de los fotosintatos asimiliados por el vástago (El-Hendawy *et al.*, 2011; Fageria y Moreira, 2011). Éste parámetro se obtiene dividiendo el peso seco del vástago entre el peso seco de la raíz (Castro-González, 2015).

$$\frac{\text{Peso seco del vástago (g)}}{\text{Peso seco de la raíz (g)}}$$

#### 4.6 Análisis estadísticos

Todos los análisis estadísticos de la presente tesis se realizaron con el programa R versión 3.5.3 (R Development Core Team, 2019) y consistieron en los siguientes:

##### 4.6.1 Análisis de varianza (ANDEVA) de una vía con bloques al azar.

Las variables dependientes fueron las variables de crecimiento y los rasgos funcionales, mientras que las variables independientes fueron los tratamientos y bloques. En todos los casos se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante el uso de la prueba Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente, así como también exploración visual. Se aplicaron transformaciones con logaritmo o raíz cuadrada en la variable de respuesta cuando fue necesario.

##### 4.6.2 Análisis de componentes de la varianza

Se recurrió a estos análisis para identificar en qué nivel de anidamiento se encontraba el mayor porcentaje de variación de todas las variables de respuesta. Para ello se consideró que los individuos estaban anidados en tratamientos, y a su vez, que los tratamientos se encontraban anidados en bloques. Para estos análisis se ajustó un modelo lineal mixto para cada rasgo funcional con efectos aleatorios y se calcularon sus componentes de varianza, mediante la paquetería *ape* (Paradis *et al.*, 2004) y *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2012).

#### 4.6.3 Correlación entre rasgos funcionales con los parámetros físicos y químicos de suelo

El objetivo de estos análisis fue el de examinar correlaciones entre variables de suelo y rasgos funcionales, y su relación con la fertilidad de los Tecnosoles. Se aplicaron correlaciones lineales de Pearson transformando los datos cuando fuera necesario.

#### 4.6.4 Análisis de componentes principales (ACP)

Este análisis permitió mostrar las posibles tendencias de covariación entre variables, al disminuir la dimensión de los datos, facilitando así la identificación de patrones de covariación. Para llevarlo a cabo se partió de un primer análisis ejecutado mediante la paquetería Psych (Revelle, 2010) y se extrajeron los componentes principales que explicaban el mayor porcentaje de la varianza. Posteriormente se aplicó la rotación varimax sobre estos componentes con el objetivo de elevar las cargas de las variables significativas para cada componente y facilitar la interpretación de los datos. Con el resultado de la rotación, se elaboraron las gráficas para analizar el espacio definido por pares de componentes.

## 5. Resultados

### 5.1 Análisis físicos y químicos de suelo

Los análisis físicos y químicos de suelo mostraron valores de densidad aparente variables entre los tratamientos. Los Tecnosoles de mayor densidad aparente fueron el 2, 4 y 5 (30% de residuos de construcción o excavación; Cuadro 4) con valores cercanos a  $0.8 \text{ g/cm}^3$  mientras que el tratamiento con menor densidad aparente fue el tratamiento 6 con  $0.5 \text{ g/cm}^3$  (55% trozos de madera, 25% composta, 20% biocarbón). La conductividad eléctrica se mantuvo en un intervalo de 0.8 (tratamiento 7) a  $1.5 \mu\text{s/cm}$  (tratamiento 2). En cuanto al pH, todos los tratamientos tuvieron una condición alcalina, siendo el tratamiento 3 (sin algún tipo de composta y con 45% de biocarbón, Figura 6) el más alcalino con un valor de pH DE 8.66. El tratamiento menos alcalino fue el tratamiento 7 con 7.3 (45% de lombricomposta). El porcentaje de carbono tuvo un rango de 8.27% (tratamiento 2: lombricomposta y trozos de madera) a 30.07% (tratamiento 6: composta y biocarbón) y se correlacionó positivamente con la concentración de nitrógeno ( $r=0.82$ ,  $p<0.05$ ), lo que nos habla del importante ratio carbono-nitrógeno. Es interesante destacar que el tratamiento más alcalino (Tratamiento 3) también presentó los valores más altos de potasio (K) con  $19.02 \text{ cmol/kg}$  y ambas variables muestran una fuerte correlación ( $r=0.70$ ,  $p<0.05$ ) como se verá más adelante. Finalmente, el tratamiento 2 mostró valores inusualmente elevados de sodio ( $22 \text{ cmol/kg}$ ), pero no fue posible

atribuirlo a algún elemento particular de su composición. En síntesis, los tratamientos que podrían considerarse de mejor calidad dada su disponibilidad de nutrientes y sus características físicas son 2, 5 y 7. En contraste, el peor tratamiento sería representado por el 3.

**Cuadro 4. Resultados de los análisis físicos y químicos de suelo para cada tratamiento**

T	DA g/cm <sup>3</sup>	DR g/cm <sup>3</sup>	P.T. %	pH	CE μs/cm	C %	N %	P mg/g	K cmol/kg	Ca cmol/kg	Mg cmol/kg	Na cmol/kg	R C/N
1	0.66	2.15	69.05	8.25	1.37	14.94	0.73	295.44	9.64	40.79	10.39	4.79	20.44
2	0.79	2.42	67.33	7.37	1.52	8.28	0.66	335.40	11.16	44.40	10.29	22.00	12.52
3	0.54	2.1	74.16	8.66	1.32	18.78	0.47	363.60	19.03	39.95	9.52	5.01	39.92
4	0.79	2.07	61.94	8.35	1.17	19.17	1.00	220.91	13.45	46.89	8.76	3.09	19.18
5	0.79	2.31	65.69	7.76	1.11	8.35	0.63	281.01	7.80	49.55	5.61	1.37	13.22
6	0.5	1.85	73.18	8.05	1.07	30.07	1.82	375.68	10.40	50.54	18.21	10.46	16.55
7	0.53	2	73.3	7.35	0.87	21.63	1.42	348.82	9.58	54.53	17.47	2.16	15.28

T: Tratamiento; DA: Densidad aparente; DR: Densidad real; P.T.: Porosidad total; CE: Conductividad eléctrica; C: Carbono; N: Nitrógeno; P: Fósforo; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; Na: Sodio; R C/N: Radio carbono-nitrógeno.

## 5.2 Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación promedio para la calabaza fue de 82.57 %, pero varió del 74 % (tratamientos 3 y 7) al 90 % (tratamiento 4: 20% biocarbón, 25% composta, 25 % trozos de madera, 30% residuos de excavación). Sin embargo, el ANDEVA ( $F_{(6, 20)}=1.686$ ,  $p=0.176$ ) reveló que no existen diferencias significativas en el porcentaje de germinación de *C. pepo* L. entre los diferentes tratamientos, a pesar de sus muy diferentes composiciones físicas y químicas (Cuadro 5).

**Cuadro 5. ANDEVA para el porcentaje de germinación de la calabaza**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.2202	0.03670	1.686	0.176
Bloque	1	0.0001	0.00012	0.006	0.941
Residuales	20	0.4353	0.02176	-	-

## 5.3 Análisis de crecimiento

El análisis de las variables del crecimiento alcanzado por las plantas a los 59 días desde la siembra (diámetro, altura y cobertura) reveló, en todos los casos, diferencias estadísticamente significativas entre Tecnosoles.

### 5.3.1 Diámetro

El ANDEVA reveló diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $F_{(6,513)}=32.95$ ,  $p<0.001$ , Cuadro 6). La prueba *post-hoc* de Tukey (Cuadro 7) reveló la existencia de al menos 3 grupos homogéneos. Los valores medios más altos corresponden al tratamiento 5 (lombricomposta 45%, residuos de construcción 30%, trozos de madera 25%), con un valor de  $12.8 \pm 0.24$ mm, que únicamente se solapa con el tratamiento 2 (lombricomposta 45%, residuos de excavación 30%, trozos de madera 25%, Figura 11). Los tratamientos 1, 4, 6, y 7 no presentaron diferencias entre sí. Por el contrario, el tratamiento 3 (biocarbón 45%, residuos de excavación 30%, trozos de madera 25%) presentó el valor medio de diámetro más bajo, con  $8.2 \pm 0.27$ mm, siendo estadísticamente diferente respecto al resto de los tratamientos.

**Cuadro 6. ANDEVA para la variable diámetro**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	894.7	149.11	32.95	<0.001
Bloque	3	441.4	147.15	32.52	<0.001
Residuales	513	2321.3	4.52	-	-

**Cuadro 7. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para diámetro**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	Cl superior	Grupo
3	8.177	0.257	513	7.671	8.682	a
7	10.998	0.256	513	10.494	11.502	b
1	11.407	0.251	513	10.914	11.900	b
6	11.676	0.239	513	11.205	12.147	b
4	11.736	0.229	513	11.285	12.187	b
2	12.049	0.271	513	11.516	12.583	bc
5	12.851	0.223	513	12.400	13.302	c

### 5.3.2 Altura

El ANDEVA reveló diferencias significativas en la altura alcanzada por las plantas a los 54 días desde la siembra entre tratamientos ( $F_{(6,513)}= 16.85$ ,  $p<0.001$ , Cuadro 8). La prueba *post-hoc* (Cuadro 9) reveló la existencia de al menos 3 grupos homogéneos, que se representan con letras en la figura 10. En este caso, el tratamiento 3 (biocarbón 45%, residuos de excavación 30%, trozos de madera 25%) fue significativamente diferente al resto, con el valor promedio de altura más bajo ( $5.3 \pm$



0.23cm), al igual que en el caso del diámetro. Por el contrario, el tratamiento 2 (lombricomposta 45%, residuos de excavación 30%, trozos de madera 25%) obtuvo los valores medios más altos ( $9.34 \pm 0.44$ cm), mientras que en el caso del diámetro los valores más altos correspondían al tratamiento 5. Es importante mencionar que los tratamientos 2 y 5 comparten lombricomposta en su composición.

**Cuadro 8. ANDEVA para la variable altura**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	739	123.12	16.85	<0.001
Bloque	3	426	141.87	19.41	<0.001
Residuales	513	3749	7.31	-	-

**Cuadro 9. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para altura**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	5.325	0.327	513	4.682	5.968	a
1	7.912	0.319	513	7.285	8.539	b
6	8.370	0.304	513	7.771	8.968	bc
4	8.441	0.291	513	7.868	9.014	bc
7	8.837	0.326	513	8.196	9.477	bc
5	9.228	0.291	513	8.655	9.801	c
2	9.483	0.345	513	8.805	10.161	c

### 5.3.3 Cobertura

Después de transformar los datos mediante raíz cuadrada para el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, el ANDEVA reveló diferencias significativas en la cobertura entre tratamientos ( $F_{(6,512)} = 15.42$ ,  $p < 0.001$ , Cuadro 10). Al igual que con el resto de las variables, el tratamiento 3 (sin composta) presentó los valores más bajos ( $1234 \pm 75.0$  cm<sup>2</sup>) mientras que el resto de los tratamientos no difirieron entre sí (Cuadro 11), presentando un rango de valores de los 2117 a los 2457.1 cm<sup>2</sup> (Figura 11).

**Cuadro 10. ANDEVA para la variable cobertura.**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	10134	1689.0	15.42	<0.001
Bloque	3	4606	1535.4	14.01	<0.001
Residuales	512	56096	109.6	-	-

**Cuadro 11. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para cobertura**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	33.821	1.277	512	31.312	36.330	a
1	44.933	1.235	512	42.506	47.360	b
6	45.849	1.179	512	43.532	48.167	b
4	46.010	1.128	512	43.792	48.228	b
7	46.340	1.262	512	43.860	48.821	b
5	47.879	1.128	512	45.661	50.097	b
2	48.029	1.336	512	45.402	50.655	b

#### 5.3.4 Análisis de componentes de la varianza para crecimiento

El análisis de componentes de la varianza aplicado sobre las tres variables de crecimiento reveló que la mayor proporción de la variación corresponde siempre a aquella entre individuos (Cuadro 12). Cabe resaltar que la variación entre tratamientos fue la más baja, siendo igual o incluso menor que la observada entre bloques. Estos resultados sugieren que *Cucurbita pepo* L. presenta una gran variación interindividual que probablemente es independiente de los Tecnosoles. Sin embargo, aun con esta gran variación entre individuos, se detectaron diferencias entre los tratamientos extremos.

**Cuadro 12. Análisis de componentes de la varianza de las tres variables de crecimiento**

Variable	Tratamientos	Bloques	Individuos
Altura	10.42%	26.82%	62.76%
Diámetro	22.87%	22.86%	54.27%
Cobertura	8.40%	18.83%	72.77%

#### 5.4 Análisis de la productividad: (Biomasa total)

Para cumplir con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, los datos fueron transformados mediante logaritmo natural. El ANDEVA mostró la existencia de diferencias significativas entre los valores de biomasa total alcanzados por las plantas en los diferentes tratamientos ( $F_{(6,86)}=2.51$   $p<0.05$ , Cuadro 13). Una vez más, el tratamiento 3 obtuvo los valores más bajos, resaltando la importancia de la incorporación de materia orgánica en la composición de los Tecnosoles. El resto de los tratamientos no se diferenciaron significativamente entre sí (Cuadro 14, Figura 11).

**Cuadro 13. ANDEVA para la variable de biomasa total**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.3344	0.05573	2.509	<0.05
Bloque	3	0.7530	0.25099	11.301	<0.001
Residuales	86	1.9544	0.02221	-	-

**Cuadro 14. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para la biomasa total**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	1.380	0.038	88	1.303	1.457	a
5	1.439	0.036	88	1.368	1.511	ab
4	1.459	0.045	88	1.368	1.550	ab
7	1.495	0.038	88	1.418	1.571	ab
2	1.508	0.048	88	1.412	1.604	ab
1	1.519	0.041	88	1.437	1.602	ab
6	1.559	0.036	88	1.487	1.631	b

#### 5.5 Comparación de rasgos funcionales entre tratamientos

##### 5.5.1 Área foliar específica (AFE)

Para cumplir con los supuestos del ANDEVA, los valores fueron transformados mediante logaritmo natural. No hubo diferencias significativas entre los valores de AFE alcanzados por las plantas entre los diferentes tratamientos ( $F_{(6,92)}=1.55$ ,  $p=0.171$ , Cuadro 15), pero sí entre bloques ( $F_{(3,92)}=4.57$ ,  $p<0.01$ ). Resaltamos la condición significativa del bloque pues es posible observar que los valores del bloque 4 fueron en promedio los más altos (Figura 11). Fue este bloque el más alejado de la pared que proveía sombra parte del día. Ya que el AFE es una unidad relacionada con la capacidad fotosintética de la planta, pues corresponde al área foliar desplegada por unidad de masa, es posible

que esos valores se deban a la incidencia de luz solar y no se relacione con la composición de los Tecnosoles.

**Cuadro 15. ANDEVA para la variable AFE**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.1213	0.02021	1.548	0.17147
Bloque	3	0.1791	0.05970	4.572	<0.01
Residuales	92	1.2013	0.01306	-	-

### 5.5.2 Contenido foliar de materia seca (CFMS)

De acuerdo con el ANDEVA, no hubo efecto de los Tecnosoles en el contenido foliar de materia seca ( $F_{(6,92)}=1.356$ ,  $p=0.241$ , Cuadro 16), sin embargo, es posible observar que los valores medios con tendencia a ser más altos corresponden a los tratamientos 3 y 7 (Figura 11). Esto sugiere que las hojas del tratamiento 3 presentaron relativamente una mayor proporción de materia seca por cada gramo de tejido, resultado congruente con una estrategia conservativa del espectro económico de hojas en el caso del tratamiento identificado como el de peor calidad en términos de fertilidad, lo cual es congruente con las predicciones.

**Cuadro 16. ANDEVA para la variable CFMS**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	4408	734.7	1.356	0.241
Bloque	3	1028	342.6	0.632	0.596
Residuales	92	49847	541.8	-	-

### 5.5.3 Densidad de tejido foliar (DTF)

De igual forma, no se encontró influencia de la composición de los tratamientos en la densidad del tejido foliar ( $F_{(6,91)}=0.379$ ,  $p=0.890$ , Cuadro 17), y en este caso no se observaron tendencias claras. De acuerdo a las predicciones, se esperaba que los peores tratamientos (p. ej. Tratamiento 3) presentaran los valores más altos de DTF, y lo contrario con los mejores tratamientos (Figura 11).

**Cuadro 17. ANDEVA para la variable DTF**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.0615	0.01025	0.379	0.8908
Bloque	3	0.1891	0.06304	2.329	0.0796
Residuales	91	2.4627	0.02706	-	-

#### 5.5.4 Biomasa del tallo

Después de transformar los datos mediante logaritmo natural para cumplir con los supuestos, se encontró que los Tecnosoles tuvieron un efecto significativo en los valores de biomasa del tallo entre los diferentes tratamientos ( $F_{6,95}=3.375$ ,  $p<0.01$ , Cuadro 18). El tratamiento 3 fue el de menor biomasa (2 g) y fue distinto de los tratamientos 2 y 6 (Cuadro 19), los cuales alcanzaron los valores medios más elevados (3.1 g y 3.5 g, respectivamente, Figura 11). En contraste, el tratamiento 3 tendió a mostrar los valores más altos de densidad específica del tallo, un resultado congruente con una estrategia conservativa que era esperado para los tratamientos de menor calidad.

**Cuadro 18. ANDEVA para la variable biomasa del tallo**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.5096	0.08494	3.375	<0.01
Bloque	3	0.5568	0.18561	7.375	<0.001
Residuales	95	2.3909	0.02517	-	-

**Cuadro 19. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para la biomasa del tallo**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	0.285	0.041	95	0.203	0.367	a
4	0.403	0.046	95	0.310	0.496	ab
5	0.406	0.038	95	0.329	0.482	ab
7	0.418	0.039	95	0.339	0.497	ab
1	0.434	0.044	95	0.346	0.522	ab
2	0.495	0.044	95	0.407	0.583	b
6	0.513	0.036	95	0.441	0.585	b

#### 5.5.5 Densidad específica del tallo (DET)

La ANDEVA reveló que las diferentes composiciones de los Tecnosoles no afectaron de forma significativa la densidad del tallo ( $F_{(6,94)}=1.822$ ,  $p=0.103$ , Cuadro 20) y tampoco los bloques ( $F_{(3,94)}=1.898$ ,  $p=0.135$ ). Sin embargo, los tallos más densos tendieron a presentarse en los tratamientos con menor contenido de materia orgánica (p.e. tratamiento 3; Figura 11). Esta tendencia también fue congruente con una estrategia conservativa esperada en un tratamiento de menor calidad.

**Cuadro 20. ANDEVA para la variable DET**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.000828	0.0001379	1.822	0.103
Bloque	3	0.000431	0.0001437	1.898	0.135
Residuales	94	0.007116	0.0000757	-	-

#### 5.5.6 Longitud específica de la raíz (LER)

El ANDEVA mostró que existe una influencia significativa de los Tecnosoles en la longitud específica de la raíz de *C. pepo* ( $F_{(6,97)}=7.35$ ,  $p<0.001$ ; Cuadro 21), mientras que los bloques no tuvieron efecto alguno ( $F_{(3,97)}=1.22$ ,  $p=0.307$ ). Más aún, los tratamientos que obtuvieron los valores promedio más altos en la mayoría de las variables de crecimiento (tratamientos 2, 5 y 7: 45% de lombricomposta) presentaron los valores más bajos de LER. En otras palabras, los mejores tratamientos en términos de pH y contenido de materia orgánica presentaron raíces con menor longitud por unidad de inversión en carbono (Figura 11), lo cual no fue congruente con la predicción de que las raíces en suelos fértiles reflejarían una estrategia positiva. La prueba *post-hoc* de Tukey (Cuadro 22) reveló la existencia de al menos 4 grupos homogéneos. En contraste con los mejores tratamientos (2, 5 y 7), los tratamientos 3 y 6 tendieron a presentar los valores más elevados de longitud por unidad de inversión en carbono, reflejando una estrategia adquisitiva. A pesar de que el tratamiento 3 carece de composta mientras que el tratamiento 6 posee un elevado contenido, ambos tratamientos tienen un pH alcalino, por encima de 8 (Cuadro 4).

**Cuadro 21. ANDEVA para la variable LER**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	82571	13762	7.354	<0.001
Bloque	3	6843	2281	1.219	0.307
Residuales	97	181511	1871	-	-

**Cuadro 22. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para LER**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
2	142.715	12.052	97	118.795	166.636	a
5	164.855	10.207	97	144.597	185.114	ab
7	180.415	10.814	97	158.951	201.879	abc
1	182.201	11.641	97	159.096	205.306	abc
4	199.371	12.783	97	173.999	224.743	bcd
3	211.801	11.241	97	189.491	234.112	cd
6	230.490	9.932	97	210.776	250.203	d

### 5.5.7 Densidad del tejido radical (DTR)

El ANDEVA mostró la existencia de diferencias significativas para los valores de DTR entre tratamientos ( $F_{(6,97)}=7.77$ ,  $p<0.001$ , Cuadro 23). Los valores medios más altos corresponden al tratamiento 7 (45% lombricomposta, 55% trozos de madera, Figura 11), seguidos por los tratamientos 2 y 5. La prueba *post-hoc* reveló la existencia de al menos 3 grupos homogéneos (Cuadro 24). En contraste con lo observado en torno a la longitud específica de la raíz (LER), en este caso los tratamientos con lombricomposta obtuvieron los valores más altos de densidad del tejido radical. Estos resultados son congruentes con una estrategia conservadora, pero fueron contrarios a lo predicho, pues se esperaba tejido radical más denso y con menor longitud por unidad de inversión de carbono en suelos de menor fertilidad.

**Cuadro 23. ANDEVA para la variable DTR**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.01723	0.0028722	7.770	<0.001
Bloque	3	0.00074	0.0002479	0.671	0.572
Residuales	97	0.03586	0.0003697	-	-

**Cuadro 24. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para DTR**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	0.060	0.004	97	0.050	0.070	a
1	0.072	0.005	97	0.062	0.083	ab
6	0.076	0.004	97	0.067	0.085	ab
2	0.087	0.005	97	0.076	0.095	bc
5	0.088	0.004	97	0.079	0.097	bc
4	0.088	0.005	97	0.077	0.099	bc
7	0.102	0.004	97	0.093	0.112	c

### 5.5.8 Área superficial específica (ASE)

Al igual que ocurrió con los demás rasgos de raíz, la composición de los Tecnosoles tuvo un efecto en el área superficial específica de la raíz ( $F_{(6,97)}=6.719$ ,  $p<0.001$ , Cuadro 25). Nuevamente, el nulo efecto de los bloques en este rasgo de raíz sugiere que estos órganos subterráneos son fuertemente influenciados por las condiciones y características del suelo. De manera concordante con los resultados de LER, los valores más altos de ASE correspondieron al tratamiento menos fértil (tratamiento 3, Cuadro 26), mientras que nuevamente los tratamientos 2, 5 y 7 (con lombricomposta) obtuvieron los valores más bajos (Figura 11). Este rasgo parece fuertemente influenciado por el pH, el tipo de composta y/o la proporción de biocarbón. Este resultado fue inesperado, pues contradice las hipótesis plantadas ya que los valores más altos de ASE (i.e. una estrategia adquisitiva) se presentaron en los tratamientos de menor calidad en términos de fertilidad, en los que se esperaba la expresión de estrategias conservativas. Es posible observar las diferencias entre tratamientos para los valores de LER y ASE cuando se hace una comparación visual de las raíces finas (Figura 13). Se observó una mayor densidad de raíces finas en individuos pertenecientes al tratamiento 3 (sin composta, en comparación con el tratamiento 5 (lombricomposta)).

**Cuadro 25. ANDEVA para la variable ASE**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	3279810	546635	6.719	<0.001
Bloque	3	134947	44982	0.553	0.647
Residuales	97	7891904	81360	-	-

**Cuadro 26. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para ASE**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	-1.456	0.042	97	-1.540	-1.371	a
1	-1.411	0.044	97	-1.498	-1.323	ab
6	-1.404	0.037	97	-1.478	-1.329	ab
2	-1.315	0.045	97	-1.406	-1.225	ab
5	-1.313	0.038	97	-1.389	-1.236	ab
4	-1.301	0.048	97	-1.397	-1.205	ab
7	-1.245	0.040	97	-1.326	-1.164	b



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

La composición de los Tecnosoles afectó el contenido radical de materia seca ( $F_{(6,97)}=3.242$ ,  $p<0.001$ , Cuadro 27). Únicamente los tratamientos 3 (sin composta) y 7 (con lombricomposta) fueron diferentes entre sí, produciendo los resultados extremos (Cuadro 28, Figura 12). El CRMS refleja la inversión de carbono por unidad de biomasa, lo que sugiere que el tratamiento 7, uno de los más favorables para el crecimiento, presentó plantas con raíces que tenían una mayor proporción de materia seca por unidad de masa, que es congruente con el resultado anterior de densidad de tejido radical, por la covariación positiva entre ambos rasgos. Sin embargo, la expresión de elevados valores de CRMS en tratamientos de alta calidad (2, 5 y 7) contradice lo predicho, ya que se esperaba la expresión de una estrategia adquisitiva en estos suelos, caracterizada por bajos contenidos de materia seca en los tejidos (i.e. una menor inversión de carbón por gramo de tejido).

**Cuadro 27. ANDEVA para la variable CRMS**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	0.5199	0.08666	3.242	<0.001
Bloque	3	0.0970	0.03234	1.210	0.310
Residuales	97	2.5932	0.02673	-	-

**Cuadro 28. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para la variable CRMS**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	-1.456	0.042	97	-1.540	-1.371	a
1	-1.411	0.044	97	-1.498	-1.323	ab
6	-1.404	0.037	97	-1.478	-1.329	ab
2	-1.315	0.045	97	-1.406	-1.225	ab
5	-1.313	0.038	97	-1.389	-1.236	ab
4	-1.301	0.048	97	-1.397	-1.205	ab
7	-1.245	0.040	97	-1.326	-1.164	b

### 5.5.10 Índice vástago-raíz

Las características de los diferentes Tecnosoles afectaron la relación de materia seca entre el vástago y la raíz ( $F_{(6,88)}=3.074$ ,  $p<0.01$ , Cuadro 29). Únicamente los tratamientos 1 y 3 fueron diferentes entre sí, con resultados extremos, mientras que el resto de los tratamientos no presentó diferencias (Cuadro 30). El tratamiento 3 presentó los valores más bajos de IVR, lo que refleja una escasa asignación de biomasa aérea respecto a la asignación de biomasa en la raíz. Esto sugiere que

las raíces tendieron a concentrar un mayor contenido de biomasa, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este mismo tratamiento para LER y ASE (Figura 12). Por el contrario, en el caso del tratamiento 1 (composta), se presentaron valores significativamente más altos del cociente, reflejando una mayor asignación de biomasa para el vástago.

**Cuadro 29. ANDEVA para la variable IVR**

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de P
Tratamiento	6	909	151.47	3.074	<0.01
Bloque	3	912	304	6.170	<0.001
Residuales	88	4336	49.27	-	-

**Cuadro 30. Resultados de la prueba post-hoc de Tukey para el IVR**

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	26.424	1.825	88	22.797	30.051	a
7	27.455	1.814	88	23.850	31.060	ab
4	31.056	2.161	88	26.760	35.353	ab
2	31.635	2.270	88	27.123	36.147	ab
5	32.043	1.703	88	28.657	35.429	ab
6	33.179	1.708	88	29.783	36.574	ab
1	35.378	1.962	88	31.479	39.277	b

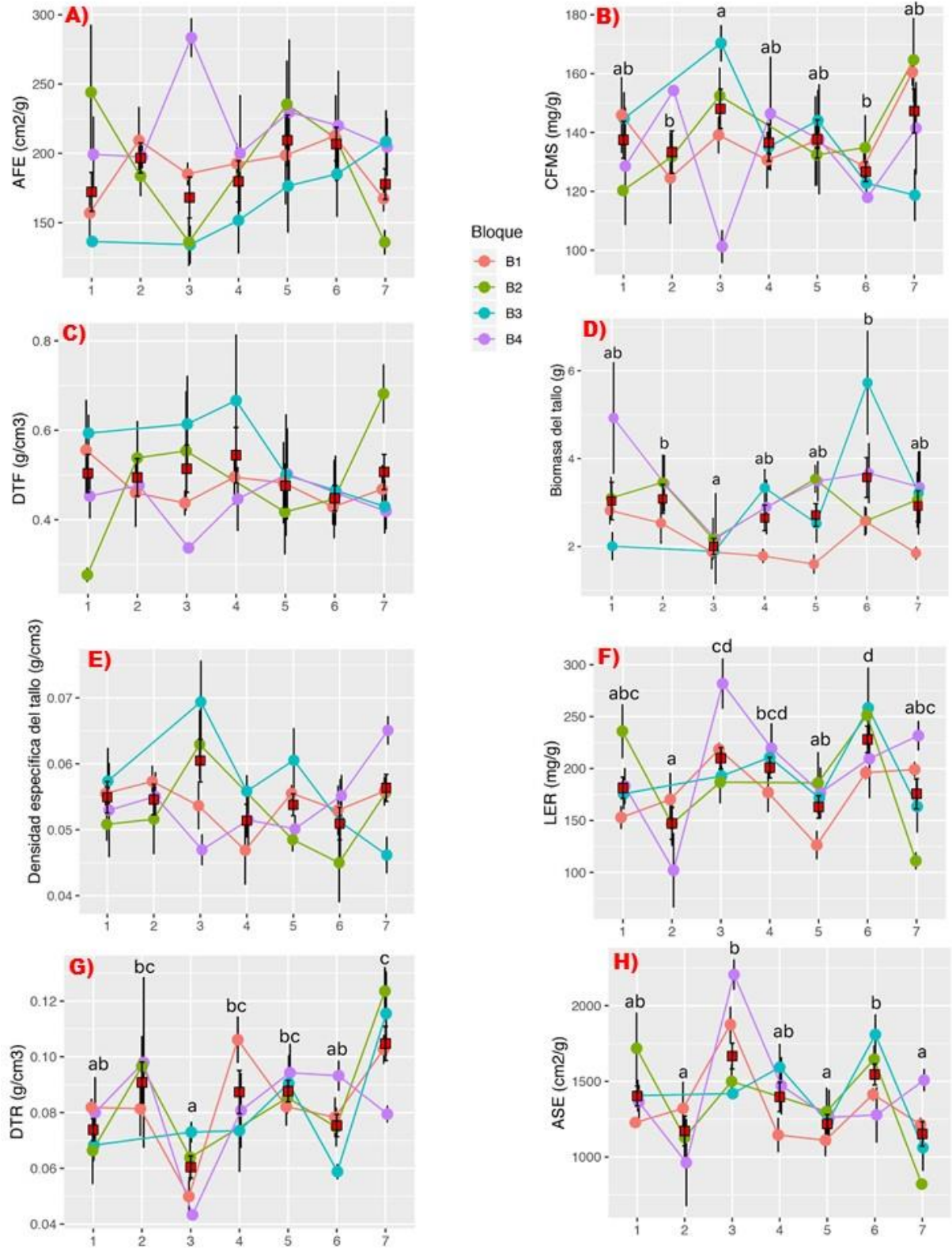


Figura 11. Medias de los valores de rasgos funcionales alcanzados por las plantas entre tratamientos, diferenciando por bloques. Medias por tratamiento considerando los bloques corresponden a cuadrados rojos. Todos los puntos se representan con su error estándar. Los números en el eje "x" hacen referencia al tratamiento.

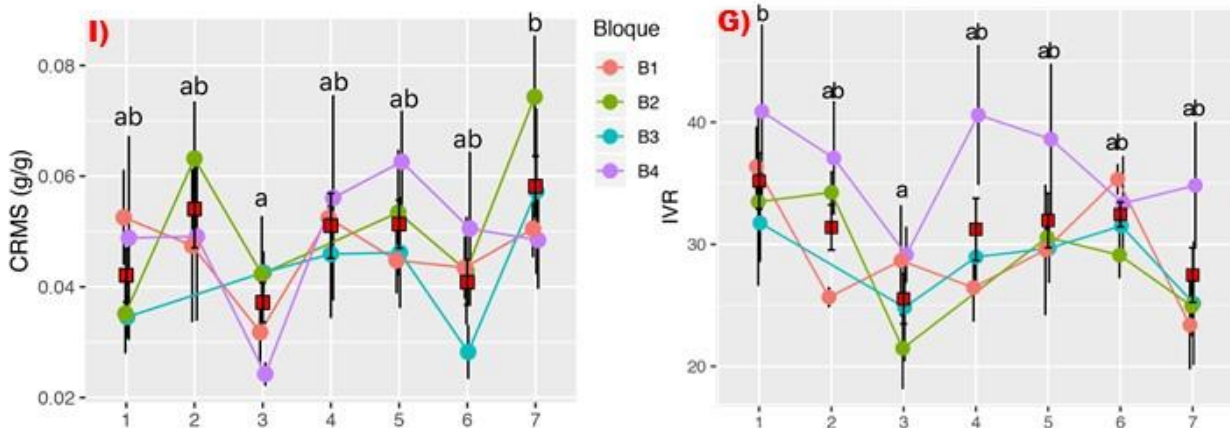


Figura 12. Medias de los valores de rasgos funcionales alcanzados por las plantas entre tratamientos, diferenciando por bloques. Medias por tratamiento considerando los bloques corresponden a cuadrados rojos. Todos los puntos se representan con su error estándar. Los números en el eje "x" hacen referencia al tratamiento.

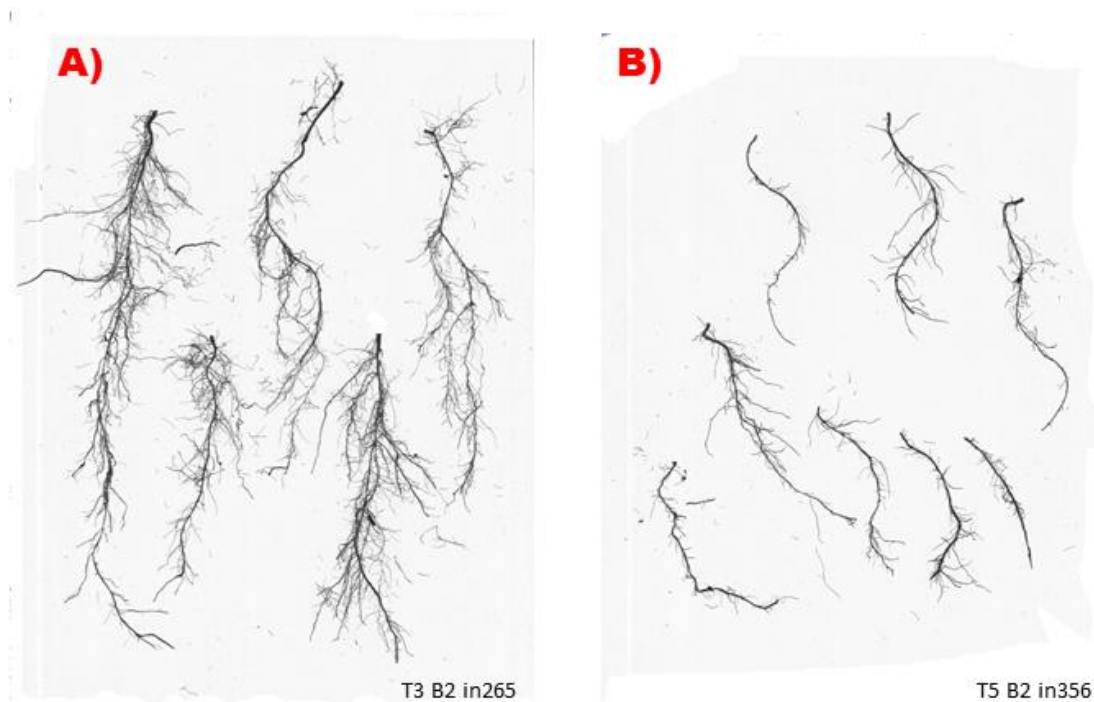


Figura 13. Imágenes de las raíces finas pertenecientes a un individuo del tratamiento 3 (inciso A) y un individuo del tratamiento 5 (inciso B). Ambos pertenecen al mismo bloque. Se aprecia una mayor densidad de raíces finas en el individuo perteneciente al tratamiento 3 (sin composta).

### 5.5.11 Análisis de componentes de la varianza para rasgos funcionales

Al igual que para las variables de crecimiento (Cuadro 12), el análisis de componentes de la varianza para rasgos funcionales mostró que el mayor porcentaje de variación en *C. pepo* cultivar "Round Zucchini" se presenta a nivel interindividual. En el caso de las variables de biomasa y la mayoría de las variables relacionadas con órganos aéreos, la proporción acumulada a nivel interindividual y

entre bloques es mayor al 95% (Cuadro 31), siendo mínima la varianza asociada a los tratamientos. Sin embargo, en el caso de los rasgos funcionales de raíz, los porcentajes de variación entre tratamientos son notablemente mayores y en algunos casos superan incluso la variación correspondiente a los bloques. Esto sugiere que los Tecnosoles parecen tener un efecto importante en la expresión de rasgos funcionales de raíz, a pesar de la gran variación interindividual que presenta esta variedad de calabaza.

**Cuadro 31. Análisis de componentes de la varianza: rasgos funcionales**

<b>Variable</b>	<b>Entre tratamientos</b>	<b>Entre bloques</b>	<b>Entre individuos</b>
Biomasa total	<1%	30.50%	68.57%
Biomasa aérea	<1%	31.28%	67.84%
Biomasa subterránea	<1%	24.42%	75.57%
<b>TALLO</b>			
Longitud del tallo	<1%	26.96%	73.03%
Diámetro del tallo	7.56%	22.16%	70.28%
DET	<1%	23.71%	76.28%
Biomasa del tallo	<1%	38.27%	61.03%
<b>HOJAS</b>			
CFMS	<1%	14.79%	85.20%
AFE	<1%	20.45%	79.54%
DTF	0%	0%	100%
<b>RAÍZ</b>			
LER	24.46%	30.94%	44.60%
DTR	29.41%	12.55%	58.04%
CRMS	11.25%	<1%	88.74%
ASE	25.06%	27.14%	47.79%
<b>OTROS</b>			
IVR	8.7%	10.39%	80.92%

## 5.6 Análisis de componentes principales (ACP)

### 5.6.1 ACP de rasgos funcionales

El primer ACP incluyó 11 rasgos funcionales y reveló la existencia de fuertes patrones de covariación entre las variables. Los dos primeros componentes principales lograron explicar el 54% de la variación, pero al añadir el tercer componente se alcanzó el 70% (Cuadro 32). Después de realizar

la rotación “varimax”, las variables que presentaron las cargas más elevadas en el primer componente principal corresponden a rasgos funcionales de raíz. La DTR y el CRMS tienen una fuerte relación positiva entre ellas y guardan una relación negativa con ASE y LER, quienes covarían entre ellas en la misma dirección. Esto soporta la hipótesis de la existencia de un espectro económico en las raíces, en el cual los tejidos con elevados valores de densidad y materia seca reflejan estrategias conservativas debido a su alto contenido de carbono, mientras que elevados valores de ASE y LER reflejan un mayor desarrollo en términos de superficie y longitud por unidad de inversión, correspondiendo a una estrategia adquisitiva. Es por esto que podemos señalar que el primer componente representa un espectro económico en raíces. Incrementos en la magnitud de este primer componente indican un manejo conservativo de recursos, mientras que los decrementos, un manejo adquisitivo. Por otro lado, el segundo componente parece reflejar un fenómeno similar con los rasgos funcionales de los órganos aéreos. Las variables AFE, diámetro y longitud del tallo tienen fuertes cargas positivas en este componente mientras que las variables CFMS, DTF y DET tienen una fuerte relación negativa con el otro conjunto de variables (Cuadro 33). La relación que existe entre el área foliar específica y las variables de crecimiento como la longitud y el diámetro del tallo refleja el efecto positivo del aumento en la eficiencia fotosintética por unidad de carbono invertida en el crecimiento. De forma análoga al espectro económico de raíces identificado en el primer componente principal, las variables de AFE, diámetro y longitud del tallo corresponden a una estrategia adquisitiva, destacando mayor superficie y crecimiento por unidad de inversión. Por otra parte, las variables asociadas con la densidad y el contenido de materia seca de los tejidos que conforman los órganos aéreos reflejan una estrategia conservativa, que implica un menor desarrollo de superficie y crecimiento por unidad de carbono. Finalmente, el tercer componente presenta fuertes cargas para las variables que podemos describir como “de crecimiento”. Éstas incluyen la biomasa total, la longitud del tallo y el diámetro del tallo. Todas éstas se relacionan de forma positiva con el tercer componente, por lo que podemos sostener que éste componente representa el crecimiento de las plantas, y el patrón sugiere la existencia de covariación positiva entre las 3 variables.

El primer análisis parece describir el espectro económico de plantas, reflejando y aludiendo las disyuntivas predichas en cuanto a la inversión de carbono. Se observa que un aumento en la superficie y longitud de los órganos inevitablemente implica menores valores de densidad y contenido de materia seca y viceversa, tanto en las hojas y el tallo como en la raíz. Estas

constricciones son propias del espectro económico de las plantas en cuanto a la estrategia empleada para invertir el carbono, así como su relación con el crecimiento de la planta.

**Cuadro 32. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros CP en el análisis de componentes principales para los 11 rasgos funcionales.**

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
Sum	2.01	1.50	1.17
Proporción de la varianza explicada	29%	25%	16%
Proporción acumulada	29%	54%	70%

**Cuadro 33. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes principales (CP) en el ACP que incluye los 11 rasgos funcionales.**

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
Biomasa total	-0.04	0.11	<b>0.87</b>
Longitud del tallo	-0.06	-0.34	<b>0.58</b>
Diámetro del tallo	0.08	-0.23	<b>0.78</b>
Densidad específica del tallo	-0.03	<b>0.62</b>	-0.16
CFMS	0.22	<b>0.77</b>	-0.25
AFE	-0.18	<b>-0.90</b>	0.03
DTF	0.26	<b>0.84</b>	0.00
LER	<b>-0.83</b>	-0.11	0.02
DTR	<b>0.90</b>	0.09	0.03
CRMS	<b>0.79</b>	0.24	-0.05
ASE	<b>-0.96</b>	-0.11	-0.02

Al observar la distribución de los tratamientos en el espacio descrito por los dos primeros componentes (Figura 14) se aprecia que los tratamientos con lombricomposta (2 5 Y 7) se distribuyen principalmente en el cuadrante positivo del primer componente, que refleja que las plantas en este tratamiento tienen raíces con bajos valores de ASE y LER, altos valores de densidad y contenido de materia seca, correspondiendo a una estrategia conservativa, mientras que el tratamiento 3 (sin algún tipo de composta) tiende a ubicarse cerca de valores altos para LER y ASE, así como bajos valores de densidad y contenido de materia seca, correspondiendo más con un manejo adquisitivo de recursos.

En contraste, en el segundo componente principal que hace referencia al espectro económico de hojas, los tratamientos con lombricomposta (2, 5 y 7) se agrupan en el cuadrante positivo, el cual hemos asociado con el extremo adquisitivo, al presentar altos valores de AFE, longitud del tallo y diámetro del tallo. Por otro lado, el tratamiento 3 se agrupa principalmente en el extremo opuesto,

correspondiente a una estrategia conservativa, es decir, con hojas y tallos más densos y con mayor contenido de materia seca. La división de las variables de raíz en un primer componente y de hoja en el segundo podría sugerir un desacoplamiento de estas variables según el órgano, sin embargo, dado que “varimax” consiste en una rotación ortogonal, ésta asume que los componentes no están correlacionados entre sí.

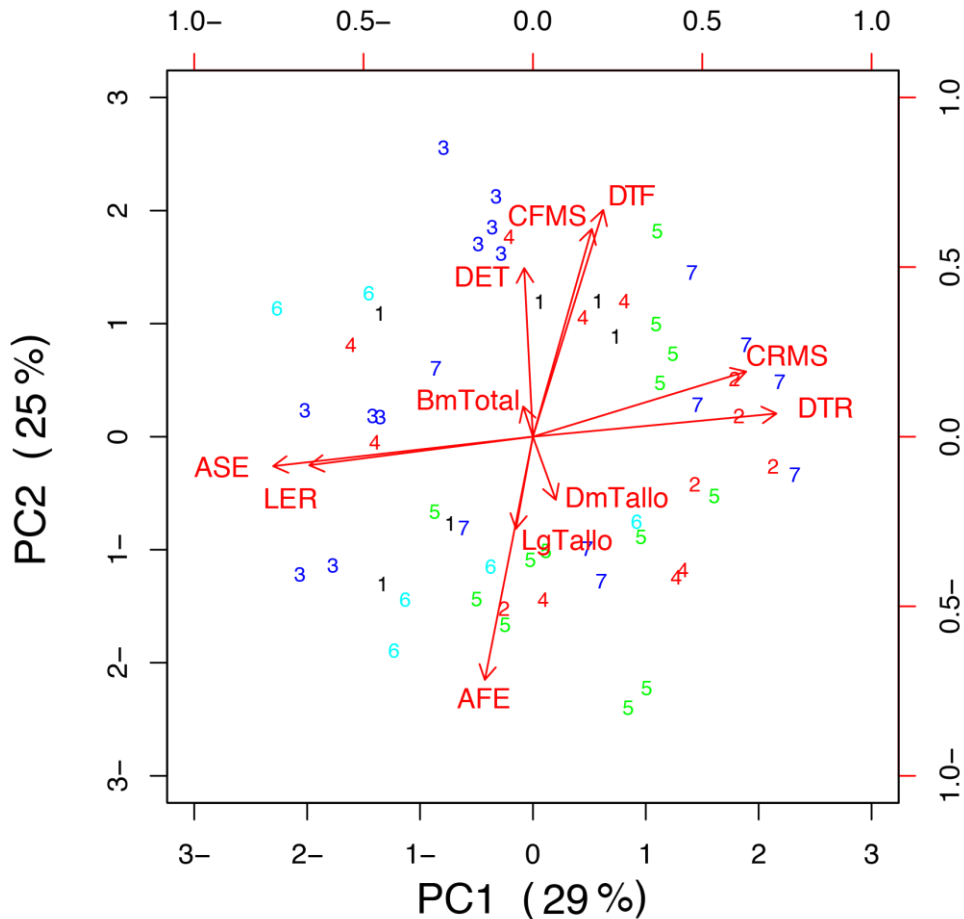


Figura 14. Representación gráfica del análisis de componentes principales para 11 variables de rasgos funcionales.

### 5.6.2 ACP de rasgos funcionales y suelo

El segundo ACP incluyó tanto las variables de rasgos funcionales como las variables edáficas. Los dos primeros componentes principales explicaron una variación acumulada menor a la del primer ACP (46.4%, Cuadro 34), sin embargo, al integrar el tercer componente la variación explicada fue del 62%. Después de aplicar la rotación *varimax*, las variables que presentan fuertes asociaciones



positivas con el primer componente son la concentración de C, la concentración de Mg, la concentración de N, la concentración de P y la porosidad total, mientras que la densidad aparente y la densidad real, forman un segundo grupo con una fuerte asociación negativa con el primer grupo de variables (Cuadro 35). Esto sugiere que el primer componente puede interpretarse como un índice de calidad del suelo, que por un lado agrupa propiedades físicas, mientras que en otro extremo se agrupan propiedades químicas, específicamente la concentración de nutrientes. En el caso del segundo componente, se observan fuertes cargas positivas en el ASE, el pH y la concentración de potasio, mientras que la DTR, y la concentración de calcio presentan cargas negativas. El segundo componente parece representar parcialmente un espectro económico de raíces en el cual el extremo adquisitivo, definido por el ASE y el LER, parece relacionarse fuertemente con el pH y la concentración de potasio mientras el extremo conservativo, definido por la DTR y el CRMS, covaría fuertemente con la concentración de calcio. Por otro lado, el tercer componente principal está claramente representado por las variables foliares (AFE, CFMS y DTF) representando nuevamente un espectro económico de hojas que parece no tener asociaciones fuertes con variables edáficas, ya que ninguna de las variables edáficas tuvo cargas fuertes en este componente (Cuadro 35).

**Cuadro 34. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros CP en el análisis de componentes principales para los 11 rasgos funcionales y las 12 variables edáficas.**

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
Desviación estándar	2.46	2.13	1.90
Proporción de la varianza explicada (%)	26	20	16
Proporción acumulada (%)	26	46	62

**Cuadro 35. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes principales (CP) en el ACP que incluye los 11 rasgos funcionales y 12 variables edáficas.**

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>
Biomasa total	0.20	-0.20	-0.28
Longitud del tallo	0.05	-0.08	-0.54
Diámetro del tallo	0.02	-0.26	-0.51
Densidad específica del tallo	0.02	0.06	0.59
CFMS	0.01	-0.16	<b>0.78</b>
AFE	-0.05	0.12	<b>-0.81</b>
DTF	-0.03	-0.23	<b>0.74</b>
LER	0.41	0.56	-0.34
DTR	-0.07	<b>-0.84</b>	0.26
CRMS	-0.11	-0.65	0.42
ASE	0.25	<b>0.80</b>	-0.32
DA	<b>-0.93</b>	-0.20	-0.14
DR	<b>-0.91</b>	-0.06	0.04
Porosidad total	<b>0.79</b>	0.23	0.20
pH	0.03	<b>0.77</b>	0.23
CE	-0.57	0.53	0.16
C	<b>0.93</b>	0.09	-0.05
N	<b>0.81</b>	-0.38	-0.28
P	<b>0.71</b>	0.17	0.10
K	0.11	<b>0.72</b>	0.40
Ca	0.41	<b>-0.75</b>	-0.31
Mg	<b>0.91</b>	-0.22	-0.09
Na	-0.03	0.07	-0.09

En el espacio definido por los dos primeros componentes (Figura 15) se observa que el tratamiento 3 se agrupa en el cuadrante positivo del segundo componente (el cual identificamos como el espectro económico de raíces asociado a pH) y en el cuadrante negativo del primer componente (asociado con las variables físicas de suelo: densidad aparente y densidad real). En este sentido, el tratamiento 3 (de menor calidad) presentó elevados valores de ASE en un medio con pH elevado (estrategia adquisitiva). Por el contrario, los tratamientos 2 y 5 (identificados como de mayor calidad) se distribuyeron en los cuadrantes negativos de ambos componentes. Estos se agruparon cerca de las variables físicas de densidad y en el extremo “conservativo” del espectro definido por el segundo componente. Lo mismo ocurrió con los tratamientos 1 y 4 que tienen composta en su composición, mientras que los tratamientos 6 y 7 se agrupan en un cuadrante positivo del primer componente (más cerca de las variables químicas de suelo, principalmente concentración de ciertos

nutrimentos) y en el cuadrante negativo del segundo componente (tendiendo hacia una estrategia conservativa en sus raíces, asociada al incremento de los valores de densidad del tejido radical).

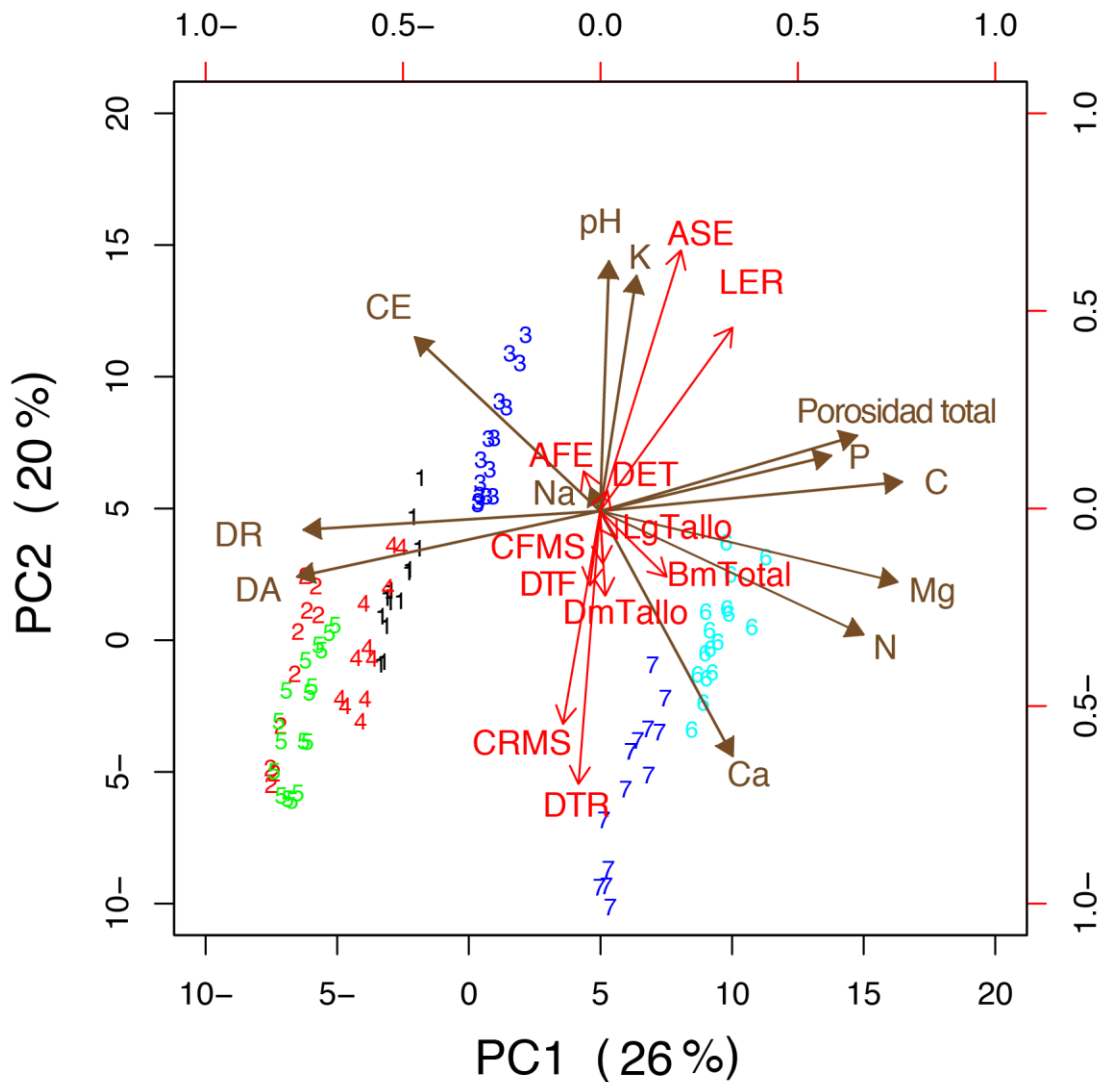


Figura 15. Representación gráfica del análisis de componentes principales para 11 variables de rasgos funcionales y 12 variables edáficas, que muestra los dos primeros componentes.

Cuando se grafican el primer y el tercer componente (Figura 16) se observa el mismo patrón de la distribución de los tratamientos en torno al primer componente, que agrupa variables físicas y químicas de suelo, en donde los tratamientos 1, 2, 4 y 5 se agrupan en torno a las variables físicas definidas por la densidad del suelo, mientras que los tratamientos 6 y 7 se agrupan principalmente en torno a las variables químicas (concentración de nutrimentos). El tratamiento 3 se distribuye ligeramente hacia las variables físicas relacionadas con la densidad del suelo. Sin embargo, el tercer componente principal parece describir el espectro económico de hojas, agrupando claramente en

el cuadrante positivo las variables relacionadas con una estrategia conservativa (mayor densidad y contenido de materia seca en los tejidos) mientras que el cuadrante negativo del tercer componente agrupa las variables relacionadas con una estrategia adquisitiva (mayor área y longitud específica) así como las variables de crecimiento (biomasa total, longitud y diámetro del tallo). La distribución de la mayoría de los tratamientos en el cuadrante negativo del tercer componente indica que, en la mayoría de los casos, los órganos aéreos reflejaron una estrategia adquisitiva, a excepción de algunos puntos que corresponden con el tratamiento 3 (Figura 16, Cuadro 35).

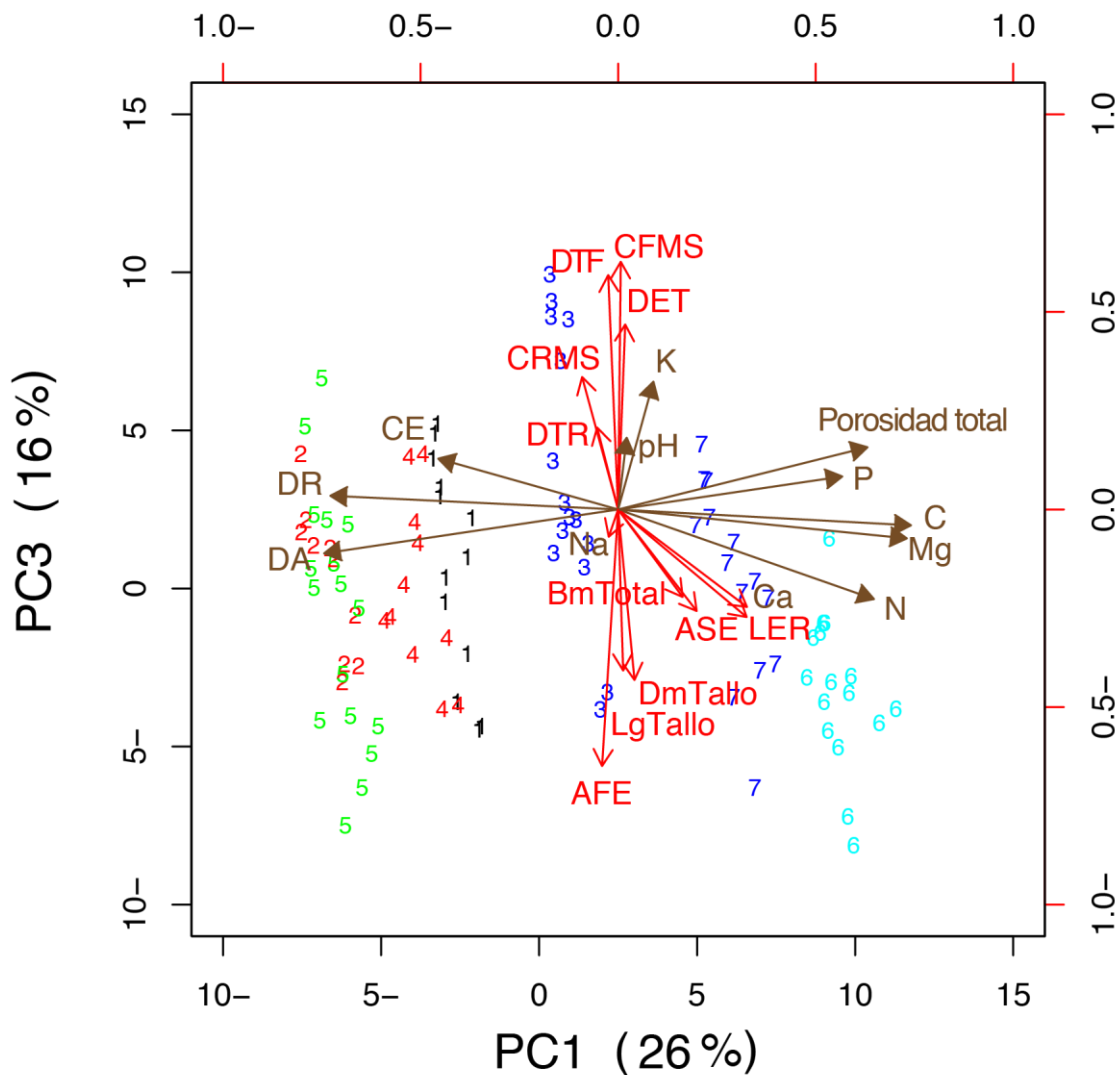


Figura 16. Representación gráfica del análisis de componentes principales para 11 variables de rasgos funcionales y 12 variables edáficas, que muestra el primer y el tercer componente.

## 5.7 Análisis de correlación

Para complementar las asociaciones observadas en los análisis de componentes principales, se analizaron las asociaciones bivariadas entre rasgos funcionales u variables físicas y químicas de suelo. De acuerdo con las predicciones planteadas, se esperaba encontrar fuertes correlaciones negativas entre rasgos que definen estrategias adquisitivas en cuanto a la inversión de carbono (e.g. AFE, longitud y diámetro del tallo, ASE, LER) y rasgos que definen estrategias conservativas (DTF, CFMS, DTR, CRMS), lo cual refleja la disyuntiva en la manera de invertir el carbono para el desarrollo de tejidos y órganos. Además, se esperaba encontrar evidencia de paralelismo entre el manejo de recursos llevado a cabo por los órganos aéreos (hojas y tallo), y los órganos subterráneos (raíces) a través de fuertes correlaciones entre rasgos análogos de órganos aéreos y subterráneos. Por otra parte, las predicciones proponían encontrar correlaciones positivas entre variables de crecimiento (longitud, diámetro y biomasa), con variables que definen estrategias adquisitivas. Finalmente, con base en la definición de calidad de suelo en términos de fertilidad, se esperaba encontrar fuertes correlaciones entre variables químicas de suelo que definieran concentración de nutrimentos, con rasgos funcionales asociados con estrategias adquisitivas.

### 5.7.1 Correlaciones que reflejan la disyuntiva en la inversión de carbono

Como era de esperarse, para un mismo órgano se presentaron altas correlaciones negativas entre rasgos relacionados con la superficie de un tejido y su densidad, lo cual hace referencia a la disyuntiva en la estrategia empleada por el organismo en cuanto a la inversión de carbono. Por ejemplo, la densidad del tejido radical mostró una intensa correlación negativa con el área superficial específica ( $r = -0.85$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17), así como el área foliar específica con la densidad de tejido foliar ( $r = -0.77$ ,  $p < 0.05$ , Figura 18 A) y el área foliar específica con contenido foliar de materia seca ( $r = -0.70$ ,  $p < 0.05$ , Figura 18 A). También se reflejaron relaciones alométricas anticipadas, como en el caso del diámetro y la longitud del tallo de *C. pepo* ( $r = 0.28$ ,  $p < 0.05$ , Figura 18 E), así como el diámetro del tallo y la biomasa total de la planta ( $r = 0.49$ ,  $p < 0.05$ , Figura 18 D). Las variables de crecimiento representadas por la longitud y el diámetro del tallo también presentaron correlaciones positivas, aunque leves, con el área superficial específica ( $r = 0.31$ ,  $p < 0.05$  y  $r = 0.20$ ,  $p < 0.05$ ; respectivamente, Figura 18 C).

### 5.7.2 Correlaciones que reflejan paralelismo entre rasgos funcionales

En la búsqueda de paralelismo entre la expresión de rasgos funcionales aéreos y subterráneos en *C. pepo* que se había planteado inicialmente, únicamente se encontraron correlaciones leves, aunque

significativas entre los rasgos que reflejan la inversión en área (AFE en hojas y ASE en raíces) o longitud (LER en raíces) para la captación de recursos por unidad de inversión de carbono. Esto se reflejó en la densidad de tejido foliar y la densidad de tejido radical ( $r= 0.30$ ,  $p<0.05$ , Figura 17), el contenido foliar de materia seca y el contenido radical de materia seca ( $r=0.32$ ,  $p<0.05$ , Figura 19 G), el área foliar específica y el área superficial específica de la raíz ( $r=0.26$ ,  $p<0.05$ , Figura 18 F), así como entre el área foliar específica y la longitud específica de la raíz ( $r=0.25$ ,  $p<0.05$ , Figura 19 H). Este aparentemente débil paralelismo puede sugerir que los rasgos de raíces están respondiendo a otras condiciones o variables en el suelo a las que no están necesariamente sujetos los órganos aéreos.

### 5.7.3 Correlaciones entre rasgos funcionales y variables edáficas

En el caso de las asociaciones entre rasgos funcionales y variables edáficas, se encontró que el pH se correlaciona negativamente con la densidad del tejido radical ( $r= -0.51$ ,  $p<0.05$  Figura 17), como había sugerido el segundo ACP. Esto muestra que ante un pH que tiende hacia la alcalinidad, la densidad de la raíz disminuye mientras que aumenta el área superficial específica ( $r= 0.49$ ,  $p<0.05$ , Figura 19 L) y la longitud específica de la raíz ( $r= 0.34$ ,  $p<0.05$ , Figura 19 M). Esto puede reflejar una inversión de la planta como parte de un esfuerzo para aumentar la exploración y búsqueda de nutrimentos, al no encontrarse disponibles por las condiciones alcalinas. Por el contrario, se observó una correlación moderada entre la longitud específica de la raíz y la concentración de carbono en el suelo ( $r=0.44$ ,  $p<0.05$  Figura 17), así como también una correlación negativa entre la densidad real del suelo y la longitud específica de la raíz ( $r= -0.43$ ,  $p<0.05$  Figura 17); también una correlación menor entre la densidad aparente y la longitud específica de la raíz ( $r= -0.34$ ,  $p<0.05$ , Figura 17). Esto puede reflejar la importancia de la adición de materia orgánica en el suelo para el mejoramiento de su estructura con la subsecuente disminución en la densidad, ya que un suelo compacto representa un impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces. Por otro lado, se encontró una correlación moderada entre la concentración de calcio en el suelo y la densidad de tejido radical ( $r= 0.45$ ,  $p<0.05$ , Figura 17). En cuanto a nutrimentos disponibles en el suelo, el análisis también reflejó que la biomasa de la planta y la concentración de nitrógeno en el suelo presentan una baja correlación positiva ( $r=0.28$ ,  $p<0.05$ ), al igual que con el magnesio ( $r=0.26$ ,  $p<0.05$ ) pero negativa respecto al potasio ( $r= -0.21$ ,  $p<0.05$ , Figura 17). La densidad específica del tallo presentó una muy baja correlación positiva con la concentración de potasio en el suelo ( $r= 0.20$ ,  $p<0.05$ , Figura 17). Lo anterior puede reflejar que la concentración de nutrimentos en los Tecnosoles no fue

determinante para el crecimiento de las plantas, pues en la mayoría de los casos presentaban valores mínimos adecuados.

#### 5.7.4 Correlaciones entre variables edáficas

Finalmente, entre las variables edáficas también se presentaron correlaciones importantes que pueden ser de gran utilidad al momento de elegir la composición de los Tecnosoles. Por ejemplo, la fuerte correlación negativa entre el carbono y la densidad aparente ( $r = -0.81$ ,  $p < 0.05$ , Figura 19 N) así como entre el carbono y la densidad real ( $r = -0.91$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17) reflejan la importancia de la adición de materia orgánica para disminuir la compactación y densidad del suelo, dando lugar a condiciones favorables como una mayor capacidad de retención de agua, espacio para el crecimiento de las raíces y la formación de microporos adecuados para la incorporación de nutrimentos por parte de las plantas así como la actividad microbiana. Se encontró una fuerte correlación positiva entre la concentración de potasio y el pH ( $r = 0.70$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17), pero se debe identificar si una mayor concentración de este ion es capaz de aumentar los valores de pH. Por su parte, el nitrógeno y el pH presentaron una baja correlación negativa ( $r = -0.27$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17). Otras correlaciones importantes se presentaron entre el calcio y la conductividad eléctrica ( $r = -0.87$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17), que resulta importante como medida para la capacidad de intercambio catiónico, característica fundamental para el ingreso de nutrimentos por parte de las raíces de las plantas; igualmente una fuerte correlación entre la concentración fósforo y la porosidad total ( $r = 0.93$ ,  $p < 0.05$ , Figura 17), ya que el incremento de la porosidad puede favorecer el intercambio gaseoso de las raíces así como la capacidad de drenaje del suelo.

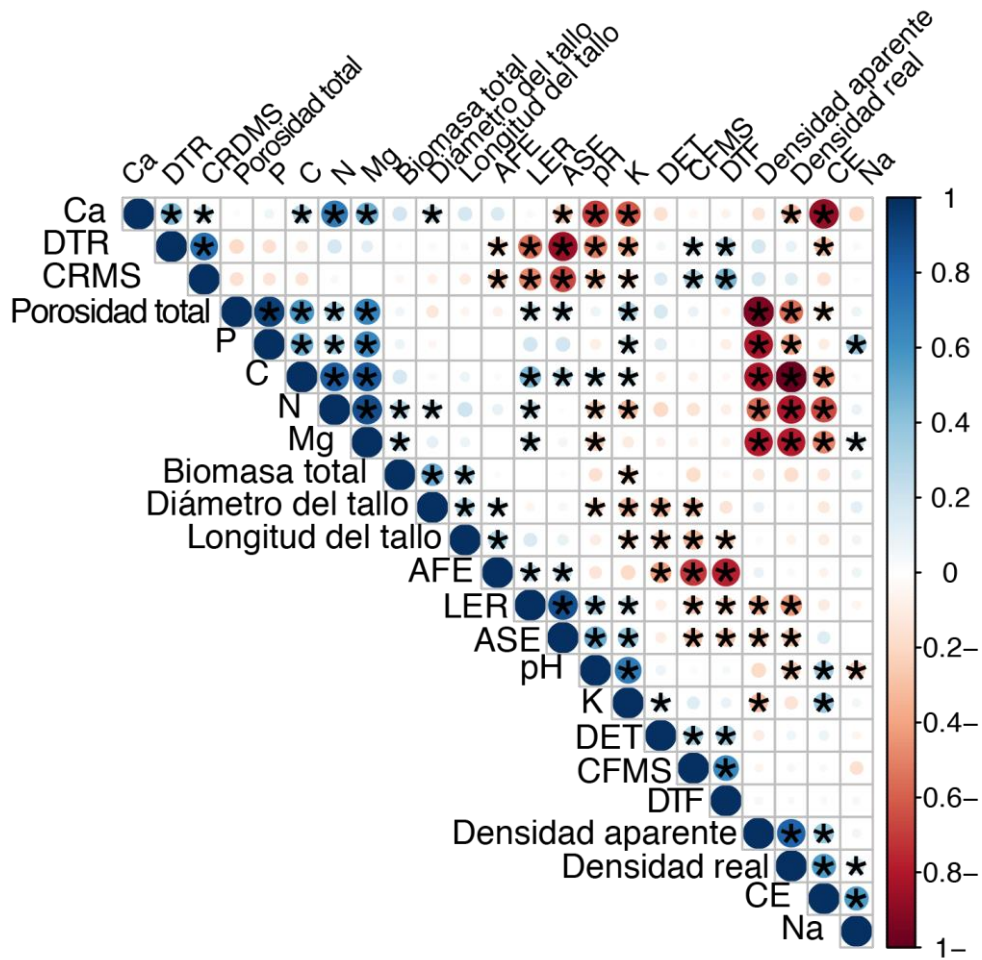


Figura 17. Matriz de correlación de Pearson entre los rasgos funcionales y variables edáficas. El tamaño de los círculos y la intensidad del color representan la intensidad de la correlación. Los círculos con asterisco representan correlaciones estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).



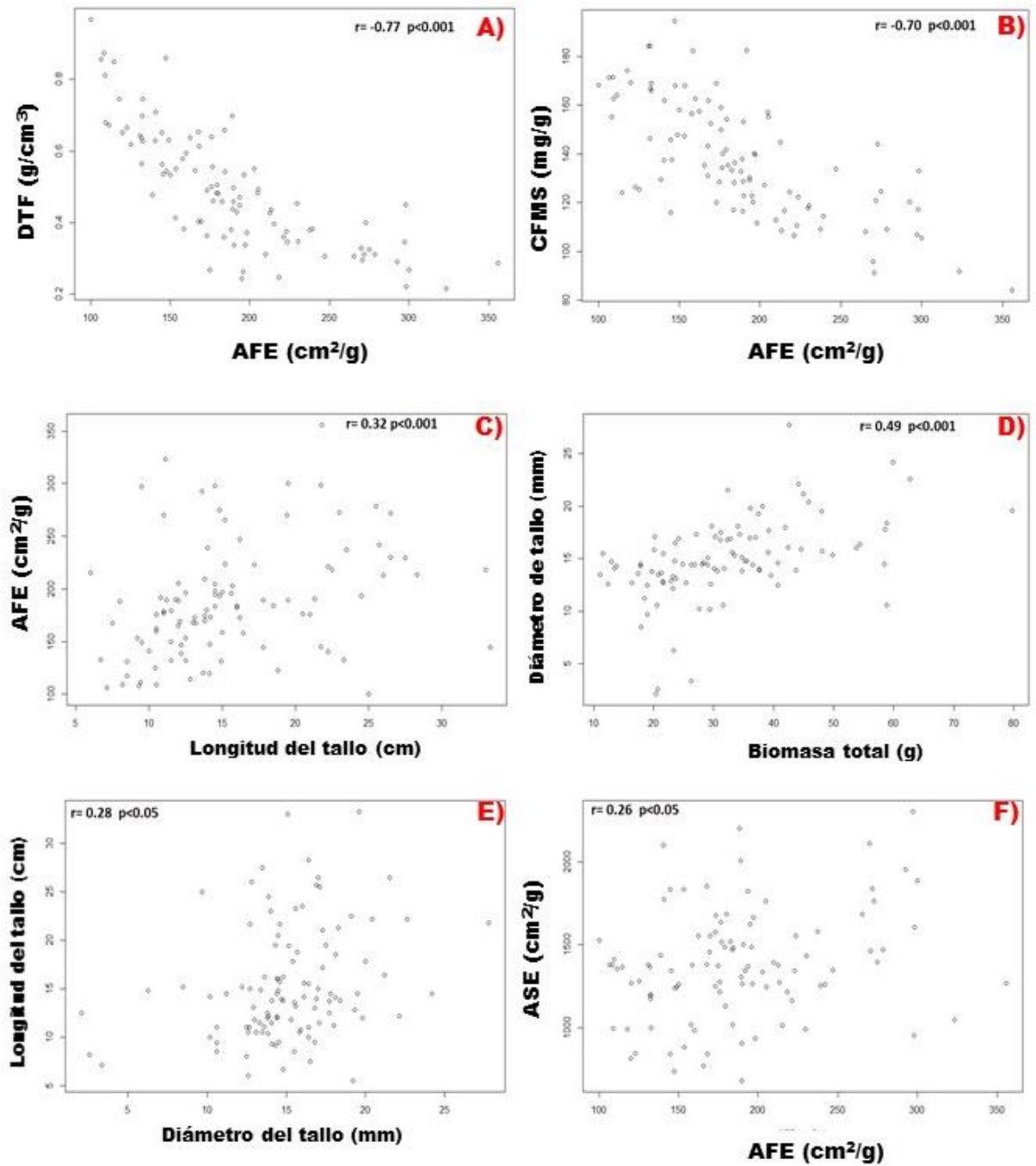


Figura 18. Análisis de correlación entre rasgos funcionales. Se muestra el coeficiente de correlación y el valor p de cada correlación. A) AFE vs. DTF B) AFE vs. CFMS C) Longitud del tallo vs. AFE D) Biomasa total vs. Diámetro del tallo E) Diámetro del tallo vs. Longitud del tallo F) AFE vs. ASE

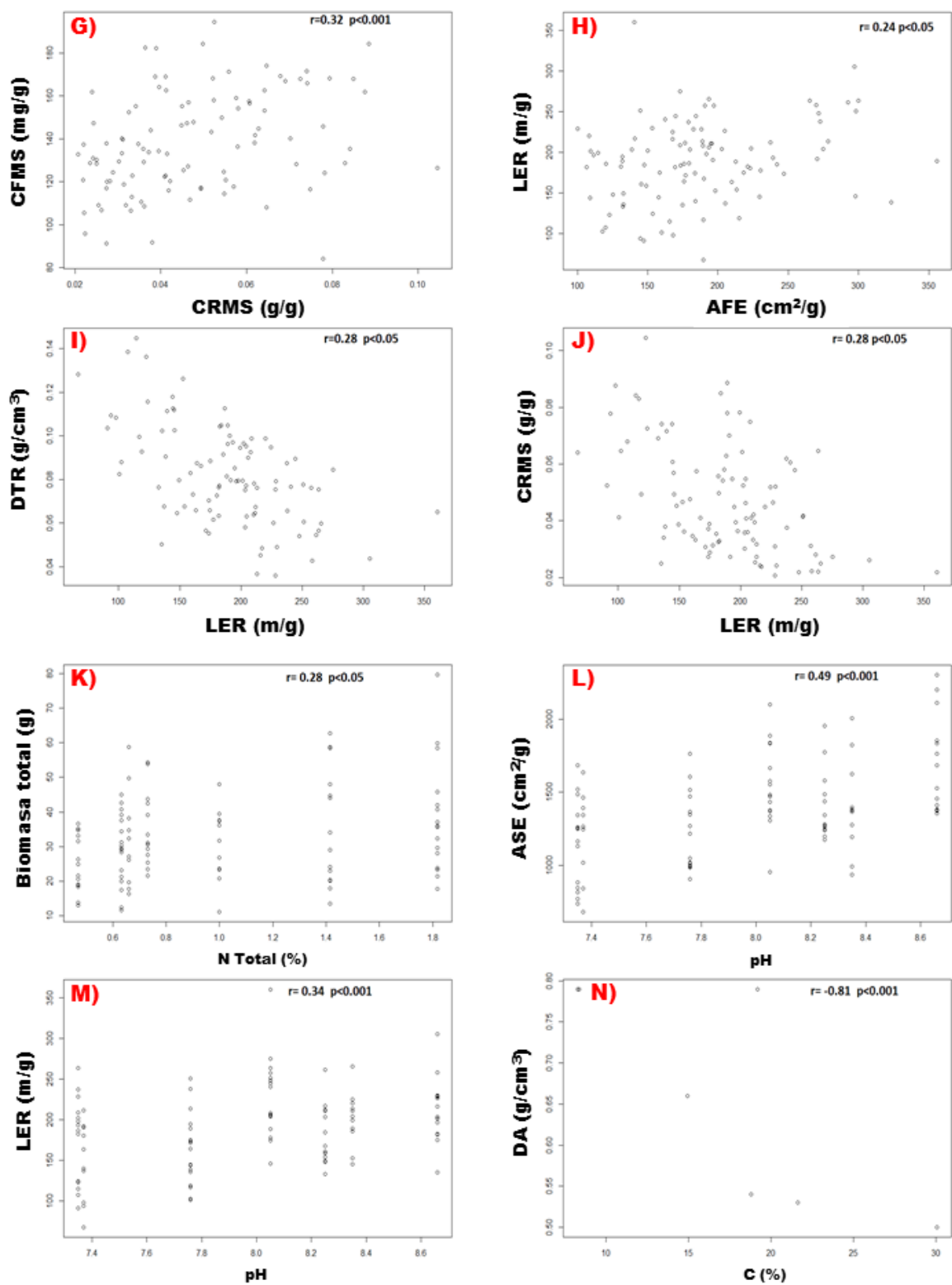


Figura 19. Análisis de correlación entre rasgos funcionales y entre rasgos funcionales y variables de suelo. Se muestra el coeficiente de correlación y el valor p de cada correlación. G) CRMS vs. CFMS H) AFE vs. LER I) LER vs. DTR J) LER vs. CRMS K) N vs. Biomasa total L) pH vs. ASE M) pH vs. LER N) C vs. DA

## 6. Discusión

A lo largo del presente estudio se encontró que todos los Tecnosoles elaborados pueden ser aptos para el crecimiento de calabaza *Cucurbita pepo* L. cultivar "Round Zucchini". Sin embargo, el desarrollo de la planta fue significativamente mejor en algunos de ellos. Aunque estas diferencias no se detectaron en la etapa de la germinación, sí se presentaron al término del crecimiento cuando las plantas alcanzaron el máximo desarrollo vegetativo, sobre todo en los rasgos funcionales de raíz como la DTR, el ASE y la LER. En esta sección se discutirá la manifestación de estos rasgos funcionales en los diferentes suelos artificiales y su relación con variables físicas y químicas, para resaltar aquellas composiciones que favorecieron el crecimiento de las plantas y representarían Tecnosoles altamente adecuados para el cultivo de éste cultivar de calabaza. Se comparan los efectos de los tratamientos en rasgos aéreos y subterráneos y se discute la existencia de paralelismo en su expresión. Igualmente, se destaca la importancia del pH y la interpretación del aumento de la longitud radical específica y el área superficial específica en tratamientos identificados como aquellos de baja calidad. Finalmente, se emiten algunas sugerencias para la preparación de Tecnosoles construidos como herramientas potenciales para el desarrollo de una agricultura urbana sostenible.

### 7.1 Germinación de *C. pepo* L. cultivar "Round Zucchini" en Tecnosoles

Todos los Tecnosoles representaron un sustrato adecuado para la germinación de *C. pepo* cv. "Round Zucchini". La germinación fue muy alta en todos los Tecnosoles (74-90%). Al no haber diferencias significativas entre los tratamientos, se puede concluir que todas las composiciones resultaron igualmente adecuadas para la germinación de la especie en condiciones al aire libre. El porcentaje de germinación aquí obtenido fue superior al 72% reportado por Escalante *et al.* (2016) para la misma variedad de calabaza en una parcela ubicada en Chilpancingo, Guerrero a 1370 msnm, con una temperatura variable entre 15°C y 24°C y un clima templado sub-húmedo, sobre un suelo de origen sedimentario y de textura gruesa, dominada por gravas. Este resultado es de gran interés pues plantea que estos suelos artificiales pueden ser adecuados para la germinación de *C. pepo*, en comparación con suelos agrícolas convencionales. Estos Tecnosoles también podrían utilizarse para elaborar sustratos para germinación *ex situ* y posteriormente realizar trasplantes. Sin embargo, se debe considerar que todas las semillas utilizadas provenían de un mismo lote, por lo que, si se quisiese hacer un análisis más preciso sobre la germinación de *C. pepo* en Tecnosoles y sus

potenciales ventajas frente a otros sustratos, se deberían utilizar distintos lotes de semillas, con el objetivo de evitar sesgo. A pesar de que no se encontraron diferencias significativas, resulta interesante analizar las características del tratamiento que obtuvo el porcentaje de germinación más alto con 90% (tratamiento 4, densidad aparente: 0.8 g/cm<sup>3</sup>, porosidad total: 61.9%) contra los más bajos con 74% (tratamiento 3, densidad aparente: 0.54 g/cm<sup>3</sup>, porosidad total: 74.16% y tratamiento 7, densidad aparente: 0.50 g/cm<sup>3</sup>, porosidad total: 73.30%). Es probable que un tecnosol con una elevada porosidad, como en el caso tratamiento 7, pueda tener una mayor pérdida de agua por evaporación, situación desfavorable para la germinación de las semillas de *C. pepo*; mientras que un tratamiento con mayor densidad y menor porosidad, como el tratamiento 4, sea capaz de retener humedad por más tiempo, incrementando las probabilidades de germinación de las semillas. La densidad aparente de un suelo y su porosidad pueden ser factores sumamente importantes para la germinación. Passioura (2002) reúne distintos trabajos en los que se demuestra que los suelos demasiado inestables y porosos (e.g. altos valores de densidad aparente) tienen consecuencias desfavorables en el desarrollo de las plantas que se relacionan con un establecimiento inadecuado como resultado de un mal contacto entre el suelo y la semilla. Esto es meramente una consideración que debería ser explorada más a fondo con el objetivo de diseñar suelos artificiales adecuados para la etapa de germinación de *C. pepo* cultivar "Round Zucchini", con las potenciales aplicaciones que eso conlleva.

## 7.2 Crecimiento de *C. pepo* en Tecnosoles

El crecimiento alcanzado por *C. pepo* fue significativamente distinto en los diferentes Tecnosoles. A diferencia de la etapa de germinación, en la que todos los Tecnosoles resultaron igualmente adecuados. En la etapa de crecimiento, analizada a los 59 días desde la siembra, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para las 3 variables analizadas (altura de la planta, diámetro basal del tallo y cobertura). En todos los casos, el tratamiento que se distinguió por presentar los valores significativamente más bajos fue el tratamiento 3 (sin algún tipo de composta). Por el contrario, los tratamientos que presentaron los valores medios más altos fueron generalmente 2, 5 y 7, los cuales tienen en común lombricomposta como parte de su composición, superando a los tratamientos con composta (1, 4 y 6), aunque en el caso de la cobertura las diferencias no fueron significativas. La lombricomposta ha demostrado ser significativamente mejor que la composta al ser utilizada como medio de cultivo de plantas ornamentales, generando un incremento en el crecimiento de las plantas. Esto se atribuye, entre otros factores, a un nivel de pH

más bajo en comparación con los frecuentes valores alcalinos que puede alcanzar la composta (Gong *et al.*, 2018). En este estudio se encontró que efectivamente, los Tecnosoles con lombricomposta obtuvieron los valores más bajos de pH (Cuadro 4) lo que puede explicar en parte los valores más altos de crecimiento para la calabaza, incluso a pesar de que la concentración de nitrógeno fuera relativamente mayor en los tratamientos con composta.

Pese a que los Tecnosoles con lombricomposta resultaron los mejores para potenciar el desarrollo de la calabaza (tratamientos 2, 5 y 7), su desempeño bien podría atribuirse al hecho de que éste grupo de tratamientos no poseía biocarbón como parte de su composición. El biocarbón consiste en biomasa vegetal procesada por medio de diferentes métodos como la torrefacción y la pirolisis. Se ha visto que tiene efectos positivos en el crecimiento de las plantas, mediante el incremento de las tasas fotosintéticas a través del incremento del nitrógeno disponible, el mejoramiento de la porosidad, la estabilidad de agregados y la capacidad de retención de agua (Nguyen *et al.*, 2017; Biligli *et al.*, 2019). Sin embargo, estudios que han caracterizado su pH señalan que tiene un valor medio de 8.1, y un intervalo que va de 6.2 a 13 (Escalante *et al.*, 2011), dependiendo de factores como el material de origen, el proceso de elaboración y su tiempo de exposición a la intemperie. Debe considerarse la naturaleza alcalina del biocarbón para la elaboración de tecnosoles, manejando las proporciones adecuadas para que su utilización no resulte contraproducente. Esto se puede apreciar en el tratamiento 3, que tiene un 45% de biocarbón en su composición (Figura 6), y al no tener materia orgánica añadida, alcanzó un valor de pH de 8.66 (el más alto de todos los tratamientos, Cuadro 4).

Es importante considerar otras características de los Tecnosoles que podrían resultar de gran importancia en su diseño y elaboración. Dentro del grupo de los tratamientos con lombricomposta, el 5 y 2 mostraron una tendencia a presentar valores medios más elevados para la altura, diámetro basal del tallo y cobertura en comparación con el tratamiento 7, también basado en lombricomposta. La diferencia sustancial con el tratamiento 7 fue la adición de aproximadamente un 30% de materiales ya sea de construcción o de excavación como parte de la composición del tratamiento 2 y 5 en lugar del 45% de trozos de madera que posee el tratamiento 7. La diferencia en el desempeño de ambos podría deberse a la abundancia de trozos de madera, que podrían elevar significativamente la concentración de carbono en el suelo, ocasionando un incremento del radio C/N por encima de 30. Esto podría ocasionar una disminución en la velocidad de mineralización del nitrógeno (Lv *et al.*, 2018) o generar un fenómeno de inmovilización por el cual no se encontraría

disponible para las plantas (Kirkby, *et al.* 2011; Kramer-Walter *et al.*, 2016). Sin embargo, ésta posibilidad es poco factible debido a que los trozos de madera empleados mostraban un avanzado grado de degradación después de haber permanecido expuestos durante 4 años a la intemperie (Anexo, Cuadros 36 y 37). Un factor que podría tomar más relevancia es la densidad aparente. Cuando las densidades son demasiado bajas los suelos dejan de cumplir con su función de dar soporte, la inestabilidad podría influir negativamente en el crecimiento y la productividad de las plantas (Passioura, 2002).

El nitrógeno es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas y a menudo se considera el de mayor importancia (Azcon-Bieto y Talón, 2003). La concentración de nitrógeno en los Tecnosoles tuvo un efecto significativo en la biomasa alcanzada por las plantas pues los valores medios de biomasa total fueron significativamente mayores para los tratamientos 6 y 7, los cuales tuvieron también el mayor porcentaje de nitrógeno total de acuerdo con los resultados del análisis químico de suelo (1.8% y 1.4% respectivamente, Cuadro 4). Además, se encontró una correlación positiva, aunque baja, entre la concentración de nitrógeno en el suelo y la biomasa total alcanzada por las plantas ( $r=0.28$ ,  $p<0.05$ , Figura 17). Sin embargo, las variables de crecimiento muestran que la concentración de nitrógeno por sí misma no es suficiente para que un tecnosol sea fértil. Aunque los tratamientos con composta presentaron más nitrógeno, el pH tendió a ser más alcalino en comparación con los tratamientos con lombricomposta, y a pesar de tener un porcentaje menor de nitrógeno, presentaron mayor crecimiento. Esto concuerda con lo reportado por Gong *et al.*, (2018) quienes estudiando geranio y caléndula encontraron que la composta utilizada sola o en combinación con *peat* reducía significativamente el crecimiento de las plantas, lo cual atribuyeron a sus elevados valores de pH. Esto refleja la importancia de combinar residuos con características contrastantes para generar un sustrato favorable para el crecimiento de las plantas, pues la fertilidad no recae únicamente en la adición de materia orgánica y nutrimentos en grandes cantidades. También es importante considerar que las propiedades de las compostas pueden variar enormemente, por lo que resulta complicado tratar de homogeneizar sus características, entre éstas, su pH.

El presente estudio sugiere que un factor de gran importancia para la fertilidad, es el pH. Se sabe que cuando el pH del suelo fluctúa entre 5.5 y 6.5 se lleva a cabo la absorción más eficiente de nutrimentos por parte de las plantas (Islam *et al.*, 1980; CONABIO, 2011). El pH puede ser uno de los factores fundamentales que determinan la calidad de los Tecnosoles analizados. Los

tratamientos con lombricomposta (2, 5 y 7) son los más favorables para el crecimiento de la calabaza, porque son los que se acercan más a éste intervalo (7.37, 7.76 y 7.35, respectivamente). En este sentido, el peor tratamiento sería el 3, al poseer el valor de pH más alcalino (8.66) y el menor porcentaje de nitrógeno total (0.47%), así como un radio C/N excesivamente alto (> 20). Esto porque en este tratamiento se obtuvieron los peores resultados para todas las variables de crecimiento incluyendo la biomasa total, una medida muy común de productividad en los sistemas agrícolas. Es por esto que el pH puede ser uno de los factores que más condiciona el desarrollo de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini” en estos Tecnosoles, a pesar de la abundante materia orgánica y nutrimentos en el suelo, aspecto que se retomará más adelante.

### 7.3 Diferencias en la expresión de rasgos funcionales en *C. pepo* cultivar “Round Zucchini” cultivada en Tecnosoles

#### 7.3.1 Relaciones alométricas para rasgos de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”

Se encontró una correlación considerable entre la biomasa de la planta y el diámetro del tallo ( $r=0.49$ ,  $p<0.05$ , Figura 18 D), lo cual implica que el diámetro basal del tallo podría ser explorado en futuros estudios como variable de fácil medición, no destructiva, en la estimación de la biomasa de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”, incluyendo el sistema radical. Esta relación podría ser de importancia para aplicaciones en torno al manejo agrícola, donde interesaría cuantificar el rendimiento a partir de variables indicadoras y no destructivas. El diámetro basal del tallo y la longitud del tallo también presentaron una correlación, aunque modesta ( $r=0.28$ ,  $p<0.05$ , Figura 18 E). La relación entre el diámetro del tallo y la biomasa, e incluso la altura de una planta, ha sido ampliamente estudiada y es bien conocida especialmente en el ámbito forestal (Brown, 1976; Petersen *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2019). Sin embargo, resulta muy interesante que existan evidencias, aunque modestas, de que éstas relaciones alométricas se mantiene en una planta de cultivo como *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”, a pesar de las presiones artificiales de selección como resultado del proceso de domesticación. El hecho de que exista evidencia, aunque modesta, de que algunas relaciones alométricas de plantas silvestres se mantengan en plantas cultivadas, como parece ocurrir en *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”, refleja la existencia de ciertas relaciones funcionales entre órganos, así como la existencia de compromisos que se mantienen a pesar de los procesos de selección artificial, y que pueden reflejar ciertas limitaciones mecánicas, físicas y/o bioquímicas (Weiner, 2004; Brym y Ernest, 2018).

Finalmente, la relación entre la longitud del tallo y el área foliar específica ( $r=0.31$ ,  $p<0.05$ , Figura 18 C), aunque no es fuerte, sugiere una tendencia que parecería mostrar los efectos en el crecimiento a partir del incremento de la capacidad fotosintética del tejido foliar, ya que aumenta la superficie por gramo de tejido foliar, e.g. el AFE (Salgado-Negret, 2016). Estas relaciones positivas entre la expresión de rasgos que reflejan estrategias adquisitivas de los órganos aéreos y las variables de crecimiento se observan en el primer y tercer análisis de componentes principales (Figuras 14 y 16).

### 7.3.2 Paralelismo en las estrategias de partes aéreas y subterráneas de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”

La búsqueda de paralelismo en los denominados espectros económicos entre las estructuras aéreas y las estructuras subterráneas de las plantas ha sido un debate constante en la literatura de rasgos funcionales (Grim, 1977; Wright *et al.*, 2004, Freschet *et al.*, 2010; Reich *et al.*, 2014; Prieto *et al.*, 2015). A menudo se han encontrado resultados contradictorios en cuanto a la existencia de este paralelismo (Mommer y Weemstra, 2012; Bardgett *et al.* 2014; Kong *et al.*, 2019). Por ejemplo, las correlaciones entre AFE y LER han resultado significativas en algunos estudios, sugiriendo paralelismo (Wright y Westoby, 1999), mientras que, en un trabajo realizado con una comunidad vegetal característica de la sabana, no se encontraron relaciones significativas (Tjoelker, 2005). Finalmente, en un estudio realizado a lo largo de una cronosecuencia de suelo, se encontró paralelismo entre el AFE y el LRE en etapas tempranas de la secuencia, pero los patrones experimentaron una inversión en las etapas tardías (Holdaway *et al.*, 2011). Estos paralelismos han sido abordados en especies silvestres, pero se desconoce si se presentan en plantas cultivadas.

Este estudio representa uno de los primeros esfuerzos por examinar la existencia de paralelismo entre órganos aéreos y subterráneos de plantas domesticadas. En este caso, a pesar de que se encontraron algunas correlaciones positivas en la expresión de rasgos aéreos y subterráneos de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”, al analizar la correlación entre pares de rasgos análogos desde el punto de vista funcional, en todos los casos se presentaron valores bajos ( $r<0.35$ , Figura 17). Las comparaciones incluyeron la densidad de tejido foliar (DTF) y la densidad de tejido radical (DTR) ( $r=0.30$ ,  $p<0.05$ ), el contenido de materia seca foliar (CFMS) y el contenido de materia seca radical (CRMS) ( $r=0.31$ ,  $p<0.05$ ), el área foliar específica (AFE) y el área superficial específica de la raíz (ASE) ( $r=0.27$ ,  $p<0.05$ ) y el área foliar específica (AFE) con la longitud específica de la raíz (LER) ( $r=0.25$ ,  $p<0.05$ ). Sin embargo, al realizar los análisis de componentes principales (Figura 14), se encontró fuerte evidencia de ausencia de paralelismo entre las estrategias de manejo de recursos empleadas



por la parte aérea y por la parte subterránea de la planta. En estos análisis, los ejes de variación de raíz y hojas estuvieron claramente representados por diferentes componentes. Este resultado sugiere que las hojas y raíces de *C. pepo* parecen comportarse de forma independiente entre sí. En ambos casos, es clara la existencia de espectros económicos, pues existen marcadas disyuntivas en cuanto a la disposición de carbono que refleja estrategias conservativas y adquisitivas, sin embargo, en este estudio no se encontró evidencia clara de respuestas coordinadas entre ambos órganos.

Aunque existe evidencia de espectros económicos análogos tanto en hojas como en raíces de *C. pepo* cultivar "Round Zucchini", así como en otros estudios con especies silvestres no leñosas (Isaac *et al.* 2017, Prieto *et al.* 2015; Roumet *et al.* 2016) y con especies domesticadas como la soya *Glycine max* (Martin *et al.*, 2019), en el presente estudio se observó que los órganos aéreos y subterráneos expresaron rasgos a lo largo de evidentes espectros económicos, pero presentaron estrategias diferentes de forma simultánea. Resulta importante resaltar que los rasgos de hoja y de raíz pueden estar respondiendo a estímulos diferentes y que por ende asignen de forma distinta los recursos disponibles dentro de ciertos límites (Mommer y Weemstra, 2012). En un estudio realizado por Yu *et al.* (2019) se observó que las relaciones entre AFE y LER cambiaron con la adición de fósforo, sugiriendo que los efectos de la disponibilidad de nutrientes en el suelo tienen efectos distintos en la expresión de rasgos de órganos aéreos y subterráneos. Esto responde porqué hay un desacoplamiento entre órganos y las correlaciones no son excepcionalmente altas entre rasgos funcionales de hojas y raíces.

El comportamiento tan diferente entre órganos aéreos y subterráneos fue evidente en el efecto de los bloques en los diferentes tratamientos. Para los rasgos aéreos, los bloques mostraron siempre diferencias significativas, resaltando la importancia de factores externos en la expresión de los rasgos de las hojas y tallos como probablemente la incidencia de luz, al tratarse la calabaza de una planta heliófila (CONABIO, 2011). En contraste, en los rasgos funcionales de raíces, los bloques no tuvieron un efecto significativo. En cuanto a las diferencias atribuidas a los Tecnosoles, ningún rasgo de hojas presentó diferencias significativas entre tratamientos. Por el contrario, todos los rasgos funcionales de raíz presentaron diferencias significativas. Esto sugiere que son las raíces la parte de la planta que más resulta afectada con las diferencias en la composición y propiedades físicas y químicas de los Tecnosoles. Por ende, son los rasgos funcionales de raíz, aquellos que pueden aportar más información sobre la calidad de suelo y las estrategias del espectro económico adoptadas por las plantas en función de sus características físicas y químicas. Aunque las raíces son

los órganos más afectados por las características de los Tecnosoles, es importante mencionar que la mejor capacidad para la adquisición de recursos por parte de la raíz se traducirá en un mejor desempeño global para todo el organismo, por lo que estrategias aparentemente descoordinadas entre órganos aéreos y subterráneos no tendrían por qué resultar ineficientes si estos llevan a cabo sus funciones individuales de forma eficiente (Mommer y Weemstra, 2012).

7.3.3 Relación entre los rasgos funcionales de hojas y raíces con variables físicas y químicas de suelo.

El análisis de rasgos funcionales arrojó resultados diferentes para la expresión de rasgos funcionales de hojas y de raíces en función de las características de los Tecnosoles. En el caso de los rasgos funcionales de hojas, en ningún caso se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, es importante señalar que sí se encontraron ciertas tendencias en cuanto a la expresión de rasgos conservativos en tratamientos de menor calidad (p. ej. AFE reducida en tratamiento 3, Figura 11) que fueron congruentes con las hipótesis planteadas en un inicio (i.e. la expresión de rasgos que reflejan estrategias adquisitivas en tratamientos de menor calidad). Estas mismas tendencias se observaron para la densidad específica y la biomasa del tallo (Figura 11). La ausencia de diferencias significativas en la expresión de rasgos funcionales de hojas puede aludir a la ausencia de estímulos directos lo suficientemente fuertes por parte de las variables del suelo. Por ejemplo, Martin *et al.* (2019) no encontraron correlaciones entre variables químicas de suelo (pH, concentración de nitrógeno, carbono, nitrógeno y fósforo disponible) y los rasgos funcionales de hojas de *Glycine max*. Por otra parte, Baltzer y Thomas (2010), encontraron dos ejes de variación al realizar un análisis de componentes principales con rasgos funcionales medidos en especies pertenecientes a una comunidad en un bosque tropical. El primer componente describía el espectro económico de hojas (Wright, 2004) que mostraba una fuerte relación con las condiciones de luz y explicaba hasta un 73.9% de la variación, mientras que el segundo componente se relacionó con la concentración de fósforo en las hojas y solo explicaba el 16.4%. Los investigadores señalaron que el aumento de la concentración de fósforo en las hojas probablemente requeriría una mayor inversión de carbono a nivel de las raíces, y por eso la escasa relación con el espectro económico de las hojas. En la presente tesis es posible concluir que las tendencias en la expresión de rasgos funcionales de hojas sí fueron congruentes con un espectro económico de hojas en función de la calidad de suelo (Navas *et al.*, 2010), reflejándose una estrategia adquisitiva en suelos de menor calidad y viceversa. A pesar de esto, la ausencia de diferencias significativas y la significancia de los bloques (dada su relación con las condiciones de luz) sugieren que los rasgos funcionales de hojas en *Cucurbita pepo*

cultivar “Round Zucchini” no son buenos indicadores para evaluar la calidad de los Tecnosoles, en comparación con los rasgos funcionales de raíces.

A diferencia de lo ocurrido en el caso de las hojas, el análisis de rasgos funcionales de raíces reveló diferencias significativas entre Tecnosoles para todos los rasgos. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron contrarios a las hipótesis planteadas en cuanto a la expresión del espectro económico en función de la calidad de los tratamientos. Esto resultó especialmente evidente en el caso del LER y el ASE. Ambos rasgos presentaron valores significativamente más bajos en los Tecnosoles de mayor calidad. Mientras que la teoría planteada por el espectro económico de raíces sugeriría que, en casos de deficiencia o limitación de la disponibilidad de nutrientes, las plantas expresarían valores de rasgos acordes con estrategias conservativas (Mommer y Weemstra, 2012; Roumet *et al.*, 2016). En el presente trabajo se observó que, en el caso de las raíces, los valores de ASE y LER fueron significativamente mayores en el tratamiento de menor calidad (tratamiento 3) y en el tratamiento 6 (con composta). Debido a que el tratamiento 6 obtuvo los porcentajes más elevados de nitrógeno total (30.1%, Cuadro 4), es factible pensar que el aumento del LER y el ASE no responden a una ausencia de nutrientes, sino más bien a limitantes en su disponibilidad, debido a la condición alcalina de estos Tecnosoles. El IVR (Figura 12 G) también reflejó una inversión significativamente mayor de biomasa en las raíces de las plantas que crecieron en el tratamiento 3, por lo que el valor del cociente disminuyó en comparación con el resto de los tratamientos. Todo lo anterior sugiere que la respuesta de las raíces de *C. pepo* en condiciones limitantes para el crecimiento es independiente e incluso opuesta a la encontrada en las hojas. Las raíces mostraron una estrategia claramente adquisitiva en los tratamientos de menor calidad, aumentando el ASE y la LER (Figura 13), además de la mayor inversión reflejada en el IVR. Esto concuerda con una mayor inversión para incrementar la búsqueda y/o absorción de nutrientes en condiciones limitantes. Dado que estos resultados rechazan las hipótesis iniciales en cuanto al comportamiento de las raíces, será importante retomar los trabajos de Grime (1976; 1977) y su clasificación de plantas ruderales, tolerantes al estrés y competitivas para replantear, en caso de ser necesario, el marco conceptual que enmarca el espectro económico de raíces (EER). Con base en lo observado en *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”, es probable que las plantas ruderales y tolerantes al estrés muestren estrategias adquisitivas, al ser características de suelos con condiciones limitantes.

La posibilidad de que las plantas busquen incrementar la absorción de nutrientes mediante un incremento de la LER se ha descrito en trabajos recientes (Kramer-Walter *et al.*, 2016, Pan *et al.*,

2018). Prieto *et al.* (2015) encontraron este mismo fenómeno en la expresión de rasgos de raíces finas a lo largo de un gradiente de condiciones de suelo en términos de fertilidad y nivel de perturbación. Contrario a lo que habían anticipado, encontraron que en suelos fértiles con escasa perturbación se presentaban rasgos de raíces acordes a una estrategia conservativa y viceversa (i.e. estrategias adquisitivas en suelos menos fértiles con mayor perturbación). Además, en el caso de las raíces gruesas se encontró un aumento de la concentración de lignina (rasgo fuertemente asociado con la densidad de tejido radical) en suelos fértiles con baja perturbación. Por otro lado, también se ha sugerido que el LER pueda seguir una estrategia independiente de la densidad de tejido radical (Kong *et al.*, 2019), a diferencia de lo que ocurre con las hojas en cuanto al AFE y la DTF (Westoby *et al.*, 1999). Sin embargo, en el presente estudio sí se encontró una fuerte covariación negativa entre la densidad del tejido radical y la longitud específica de la raíz de *C. pepo* cultivar "Round Zucchini" (es importante recordar que los rasgos se midieron en raíces finas <2mm). Esto bien puede deberse a la disyuntiva en la asignación de carbono en la que un aumento en la LER inevitablemente implica una disminución de la densidad de carbono y lignina (materia seca) (McComarck *et al.* 2012) y viceversa. El presente estudio proporciona fuertes evidencias respecto a la existencia de un espectro económico de raíces, con claras relaciones entre rasgos, aunque con una respuesta distinta a los fenómenos observados en las hojas.

Dado que no se encontró evidencia de que la concentración de nutrientes en los Tecnosoles estudiados sea una variable determinante para la expresión de diferentes estrategias a lo largo de los espectros económicos de raíces, el pH se reveló como una variable central en este estudio. Algunos autores consideran que el pH es la variable de mayor importancia para la fertilidad del suelo ya que influye de manera determinante en la disponibilidad relativa de ciertos nutrientes minerales esenciales para las plantas (McGrath *et al.* 2014). Dado que se reporta que *C. pepo* se desarrolla mejor en suelos con un rango de pH entre 5.5 y 6.5, es posible que la condición alcalina de la mayoría de los Tecnosoles empleados en el estudio limite su crecimiento y obscurezca el efecto de la disponibilidad o ausencia de otros nutrientes. Esto es evidente en el tratamiento 3, que además de tener una concentración menor de nutrientes como el nitrógeno, posee el valor más alcalino de pH (8.66). En vista de la fuerte correlación entre el pH y la concentración de potasio en los Tecnosoles ( $r=0.70$ ,  $p<0.05$ , Figura 17) resulta sumamente importante considerar un manejo del pH en el diseño de estos sustratos artificiales, debido a la naturaleza alcalina de los materiales de construcción y excavación (Anexo: Cuadro 36). En condiciones de alcalinidad, como las que presentaron en mayor o menor medida todos los Tecnosoles en este estudio, es necesario

considerar las técnicas de acidificación, además de la adición de materia orgánica, para alcanzar un pH que favorezca el crecimiento de las plantas de calabaza. Esto podría lograrse en cultivos urbanos mediante diferentes técnicas de manejo de suelos, como la corrección del radio C/N o la acidificación controlada (Fageria y Moreira, 2011).

#### 7.4 Recomendaciones para la elaboración de Tecnosoles adecuados para *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”

Antes de emitir conclusiones, se debe aclarar que, en el presente trabajo, no fue posible realizar un análisis de productividad con los frutos y semillas de *C. pepo*, debido que la caída atípica de granizo dañó las plantas después de que éstas habían alcanzado su máximo desarrollo vegetativo, lesionando los tejidos y permitiendo el ingreso de patógenos. Éste debilitamiento ocasionó infecciones en las plantas, que probablemente fueron ocasionadas por hongos patógenos del genero *Fusarium*, con base en los síntomas observados (Figura 20). Debido a lo anterior, se perdieron numerosos frutos, lo cual imposibilitó la realización de pruebas estadísticas confiables, descartando ésta parte del análisis. La razón de cultivar las plantas a cielo abierto fue el exponerlas a las condiciones meteorológicas comunes de la Ciudad de México, con el objetivo de llegar a conclusiones lo más cercanas a la realidad, sin embargo, sería adecuado proveer de protección a las plantas en futuros estudios, mediante la implementación de mallas que resistan la caída de granizo, pero a la vez permitan la entrada de luz solar.



Figura 20. Daños al cultivo ocasionados por patógenos, una vez que las plantas habían alcanzado su máximo desarrollo vegetativo.

A pesar de las dificultades anteriormente mencionadas, el análisis de productividad realizado a través de la biomasa total de las plantas constituye una aproximación adecuada para obtener conclusiones sobre el desarrollo potencial de las plantas en los Tecnosoles, y cabe mencionar que las plantas alcanzaron la etapa de reproducción sexual (Figura 21). Es posible concluir que el cultivo de calabaza (*C. pepo* L. cultivar Round Zucchini) resultó factible en todos los tecnosoles evaluados en el presente estudio, desde la etapa de germinación hasta la etapa de máximo desarrollo vegetativo.

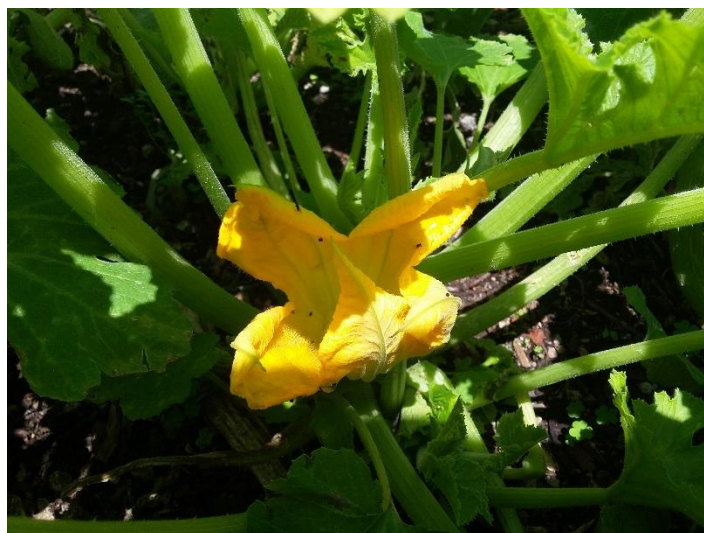


Figura 21. Etapa de reproducción sexual alcanzada por las plantas de *C. pepo* cultivar "Round Zucchini" cultivada en Tecnosoles.

Como consideración para la elaboración de Tecnosoles adecuados para el crecimiento de *C. pepo* cultivar "Round Zucchini" se deberá elegir una composición que mantenga el pH en un rango ligeramente ácido (entre 5.5 y 6.5). Debido a que la materia orgánica ya es abundante en los Tecnosoles preparados para el presente estudio (excepto el tratamiento 3), resulta necesario considerar métodos alternativos para acidificar el medio, como la adición de quelatos, azufre o ácido ascético. En general, el pH de las lombricompostas es más ácido que en la composta y contribuiría más eficientemente a reducir el pH de los Tecnosoles. Por otro lado, se deberá considerar el pH del biocarbón, ya que se ha determinado que éste material tiene un valor medio de pH de 8.1 (Escalante, *et al.*, 2011). Debido a lo anterior, los beneficios de la implementación del biocarbón dependerán de su proporción respecto a los demás componentes del TecnoSol, así como el pH inicial del TecnoSol. Resulta igualmente importante lograr una adecuada densidad aparente (baja, menor a  $0.9 \text{ g/cm}^3$ ) y una porosidad total mayor a 15% (González-Núñez *et al.*, 2015). El exceso en la proporción de residuos con partículas finas, puede tener un efecto indeseado al incrementar la

densidad y disminuir el espacio poroso que necesitan las raíces para llevar a cabo los procesos de exploración y respiración. Este es un aspecto que podría ser mejorado fácilmente con la adición de biocarbón (Bilgili *et al.*, 2019; Mandal *et al.*, 2019). Es posible sugerir una proporción similar a la del tratamiento 5, con un 45% lombricomposta, 30% residuos de construcción y posiblemente sustituir el 25% de trozos de madera por un 25% de biocarbón, como una composición estándar que resulte idónea para la elaboración de tecnosoles que tengan como objetivo el cultivo de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini”.

#### 7.5 Preguntas para abordar en futuros estudios

Las plantas de cultivo constituyen modelos sumamente valiosos para el análisis de la expresión de rasgos funcionales en función de diferentes gradientes ambientales, así como las relaciones que existen entre sus diferentes órganos. Su rápido crecimiento y el hecho de ser resultado de intensos procesos de selección las vuelven sistemas de estudio ideales para conocer los límites biológicos en cuanto a la modificación y expresión de rasgos funcionales. Esto resulta de gran interés para los estudios en torno a la seguridad alimentaria y la resiliencia frente al cambio climático, dada su influencia en los servicios ecosistémicos (Van Bodegom *et al.*, 2015; Wood *et al.*, 2015; Bukovsky-Reyes *et al.*, 2019). Sin duda, será crucial implementar estudios con otras plantas de gran importancia económica y cultural, como en el caso del maíz y el frijol. Resultaría de gran interés evaluar el cultivo de un sistema agroecológico como la milpa, sobre Tecnosoles.

Por mucho tiempo, el conocimiento generado a partir del estudio de plantas silvestres se ha aplicado en el conocimiento y entendimiento de los sistemas domesticados; sin embargo, el presente trabajo plantea la posibilidad de abordarlo en sentido inverso. Es momento de poner a prueba miles de años de domesticación de los sistemas naturales y analizar la información que nos pueden proveer sobre el conocimiento de las plantas silvestres. Los impactos potenciales que esto puede traer para diversas ramas como la biología evolutiva, la ecología y la agronomía incluyen el estudio y manejo de servicios ecosistémicos, el entendimiento de procesos evolutivos, criterios para la selección de rasgos funcionales que incrementen la resistencia a factores ambientales adversos e incluso la modelación de la modificación de rasgos funcionales en escenarios de cambio climático. Lo anterior plantea la posibilidad entender a las plantas de cultivo como algo más que alimento y construir un nuevo marco conceptual lleno de herramientas para hacer frente a incógnitas que persisten en torno a los sistemas naturales.

## 7. Conclusiones

- Los Tecnosoles elaborados a partir de la mezcla de biocarbón, compostas, materiales de construcción, excavación y trozos de madera; constituyen sustratos viables para el cultivo de calabaza *Cucurbita pepo* L. cultivar “Round Zucchini” desde la etapa de germinación, y constituyen una alternativa sostenible para frenar la extracción de suelo de origen natural en prácticas de agricultura urbana, mantenimiento de jardines y como sustratos para viveros.
- La adición de materia orgánica es fundamental para incrementar la calidad de los Tecnosoles. La lombricomposta demostró ser superior a la composta como elemento que favorece de forma significativa el crecimiento de *C. pepo* L. cultivar “Round Zucchini”.
- Las variables más importantes que se deben considerar al momento de rediseñar y elaborar Tecnosoles para esta especie son: 1) el pH en un intervalo de 5.5 a 6.5 2) la adición de al menos un 45% de materia orgánica, preferentemente lombricomposta, 3) mantener una densidad aparente menor de 0.9 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad mayor al 20% y 4) elegir la composición complementaria con residuos que mantengan un adecuado radio C/N (entre 10 y 15).
- Se encontraron claros espectros económicos tanto en hojas como en raíces de *C. pepo* cultivar “Round Zucchini” que describen gradientes definidos por dos extremos en cuanto al manejo de recursos: 1) un extremo conservativo caracterizado por tejidos de alta densidad y elevado contenido de materia seca y 2) un extremo adquisitivo caracterizado por tejidos de mayor superficie y longitud por unidad invertida de carbono. Sin embargo, el espectro económico de hojas (EEH) y el espectro económico de raíces (EER) se mostraron independientes entre sí y no se encontraron evidencias contundentes que sugieran paralelismo entre ambos. A diferencia del EEH, los rasgos funcionales de raíces respondieron de forma significativa a las características de los Tecnosoles. Los tratamientos de mayor calidad presentaron raíces con rasgos acordes a estrategias conservativas (altos valores de DTR y CRMS) mientras que los tratamientos de menor calidad presentaron raíces con expresiones acordes a estrategias adquisitivas (altos valores de LER y ASE). Los rasgos funcionales de raíces demostraron ser buenos indicadores para la evaluación de la calidad de los Tecnosoles.



## 8. Anexo

**Cuadro 36. pH, conductividad eléctrica (CE) y densidad real de los residuos individuales empleados para preparar los 7 tratamientos.**

Muestra	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	Densidad Real ( $\text{g/cm}^3$ )
Madera	5.3	584	*
Composta CDMX	6.9	5860	1.8
Lombricomposta	6.8	7010	1.9
Residuo de excavación	7.7	295	2.2
Residuo de construcción grueso	8.1	1970	2.5
Residuo de construcción fino	8.8	1375.5	2.5

\*No es posible medir ésta variable debido al método utilizado.

**Cuadro 37. Nutrimientos totales de los residuos individuales empleados para preparar los 7 tratamientos.**

	N	P	K	Ca mg/kg	Mg	Fe	Al
Madera	8110	443	2507	15637	1179	295	190
Composta CDMX	19780	6813	12396	37211	5685	9735	5219
Lombricomposta	11280	4716	13496	22720	4698	6795	8129
R. Excavación	-	473	1405	8423	5393	13452	15050
R. Construcción grueso	-	481	2353	51666	4419	17488	9019
R. Construcción fino	-	538	1789	41929	5188	10564	9005

**Cuadro 38. Matriz de coeficientes de correlación y valores de p para rasgos funcionales y var. edáficas**

	BMTot	Ltallo	Dtallo	DET	CFMS	AFE	DTF	LER	DTR	CRMS	ASE	da	dr	PT	pH	CE	C	N	P	K	Ca	Mg	Na
BMTot	1	0.00	0.00	0.86	0.09	0.84	0.72	0.94	0.88	0.68	0.82	0.28	0.09	0.54	0.14	0.22	0.08	0.01	0.46	0.04	0.08	0.01	0.45
Ltallo	0.32	1	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.12	0.71	0.35	0.35	0.79	0.53	0.57	0.37	0.35	0.47	0.06	0.94	0.03	0.09	0.47	0.53
Dtallo	0.49	0.30	1	0.00	0.00	0.04	0.19	0.60	0.72	0.50	0.64	0.38	0.79	0.23	0.03	0.27	0.70	0.02	0.67	0.00	0.02	0.30	0.28
DET	0.02	-0.26	-0.34	1	0.00	0.00	0.00	0.39	0.60	0.17	0.37	0.35	0.51	0.11	0.44	0.45	0.49	0.06	0.24	0.04	0.12	0.55	0.61
CFMS	-0.18	-0.35	-0.30	0.33	1	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.63	0.69	0.44	0.78	0.72	0.52	0.16	0.91	0.19	0.63	0.57	0.13
AFE	-0.02	0.31	0.21	-0.41	-0.70	1	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.43	0.70	0.47	0.20	0.53	0.81	0.36	0.98	0.07	0.13	0.99	0.47
DTF	-0.04	-0.25	-0.14	0.35	0.64	-0.78	1	0.02	0.00	0.00	0.00	0.65	0.75	0.59	0.65	0.73	0.69	0.44	0.40	0.43	0.54	0.56	0.65
LER	0.01	0.16	-0.05	-0.09	-0.28	0.26	-0.24	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.31	0.00	0.01	0.08	0.02	0.73	0.02	0.58
DTR	0.02	-0.04	0.04	0.05	0.22	-0.23	0.31	-0.56	1	0.00	0.00	0.09	0.36	0.08	0.00	0.00	0.28	0.09	0.14	0.00	0.00	0.28	0.73
CRMS	-0.04	-0.10	-0.07	0.14	0.32	-0.31	0.45	-0.49	0.76	1	0.00	0.10	0.20	0.12	0.00	0.15	0.17	0.74	0.19	0.04	0.01	0.99	0.88
ASE	-0.02	0.10	-0.05	-0.09	-0.29	0.27	-0.29	0.87	-0.85	-0.66	1	0.01	0.01	0.02	0.00	0.19	0.00	0.91	0.07	0.00	0.00	0.59	0.94
da	-0.11	0.03	0.09	-0.10	-0.05	0.08	0.05	-0.35	0.17	0.17	-0.28	1	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.57
dr	-0.17	-0.07	-0.03	0.07	0.04	0.04	0.03	-0.44	0.09	0.13	-0.28	0.81	1	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.04
PT	0.06	-0.06	-0.12	0.16	0.08	-0.07	-0.06	0.23	-0.18	-0.16	0.23	-0.94	-0.55	1	0.48	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.46
pH	-0.15	-0.09	-0.22	0.08	0.03	-0.13	0.05	0.34	-0.52	-0.32	0.49	-0.19	-0.28	0.07	1	0.00	0.01	0.01	0.40	0.00	0.00	0.01	0.01
CE	-0.13	-0.10	-0.11	0.08	-0.04	-0.06	0.04	-0.10	-0.31	-0.15	0.14	0.38	0.57	-0.21	0.34	1	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.18	0.07	0.04	-0.07	-0.07	-0.03	-0.04	0.45	-0.11	-0.14	0.29	-0.82	-0.98	0.58	0.25	-0.48	1	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.79
N	0.28	0.19	0.23	-0.19	-0.14	0.09	-0.08	0.26	0.17	0.03	0.01	-0.56	-0.80	0.35	-0.27	-0.65	0.82	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
P	0.08	0.01	-0.04	0.12	0.01	0.00	-0.09	0.18	-0.15	-0.13	0.18	-0.82	-0.41	0.93	-0.09	-0.09	0.50	0.37	1	0.02	0.51	0.00	0.00
K	-0.21	-0.22	-0.32	0.21	0.13	-0.18	0.08	0.24	-0.38	-0.21	0.40	-0.30	-0.15	0.32	0.70	0.37	0.20	-0.33	0.24	1	0.00	0.32	0.59
Ca	0.18	0.17	0.25	-0.16	-0.05	0.16	-0.06	-0.04	0.46	0.25	-0.30	-0.13	-0.33	0.03	-0.69	-0.87	0.30	0.70	0.07	-0.61	1	0.00	0.06
Mg	0.26	0.07	0.11	-0.06	-0.06	0.00	-0.06	0.24	0.11	0.00	0.06	-0.79	-0.79	0.67	-0.26	-0.49	0.83	0.88	0.66	-0.10	0.50	1	0.04
Na	0.08	0.07	0.11	-0.05	-0.15	0.07	-0.05	-0.06	-0.04	-0.02	-0.01	0.06	0.21	0.08	-0.26	0.57	-0.03	0.08	0.38	0.06	-0.19	0.21	1

El cuadrante inferior corresponde a los valores del coeficiente de correlación, mientras que el cuadrante superior corresponde a los valores p. BMTot: Biomasa total; Ltallo: Longitud del tallo; Dtallo: Diámetro del tallo; DET: Densidad específica del tallo; CFMS: Coeficiente foliar de materia seca; AFE: Área foliar específica; DTF: Densidad del tejido foliar; LER: Longitud específica de la raíz; DTR: Densidad del tejido radical; CRMS: Contenido radical de materia seca; ASE: Área superficial específica; DA: Densidad aparente; DR: Densidad real; P.T.: Porosidad total; CE: Conductividad eléctrica; C: Carbono; N: Nitrógeno; P: Fósforo; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; Na: Sodio.

## 9. Referencias Bibliográficas

- Armanda, D. T., Guinée, J. B., y Tukker, A. (2019). The second green revolution: Innovative urban agriculture's contribution to food security and sustainability – A review. *Global Food Security*, 22(August 2018), 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.08.002>
- Ayala-Sierra A. y Valdez-Aguilar L. A. (2008). El polvo de coco como sustrato alternativo para la obtención de plantas ornamentales para trasplante. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 14 (2), 161-167
- Azcón-Bieto, J., y Talón, M. (2003). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGrawHill. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Azunre, G. A., Amponsah, O., Peprah, C., Takyi, S. A., y Braimah, I. (2019). A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse. *Cities*, 93(April), 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.006>
- Baize D, Girard A. 2008. *Pedological Reference 2008 (in French)*. Editions Quae, Versailles.
- Baltzer, J. L., y Thomas, S. C. (2010). A second dimension to the leaf economics spectrum predicts edaphic habitat association in a tropical forest. *PLoS ONE*, 5(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013163>
- Baveye, P. C., Baveye, J., & Gowdy, J. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4(JUN), 1–49. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Bilgili, A. V., Aydemir, S., Altun, O., Sayğan, E. P., Yalçın, H., y Schindelbeck, R. (2019). The effects of biochars produced from the residues of locally grown crops on soil quality variables and indexes. *Geoderma*, 345(August 2018), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.010>
- Birouste, M., Zamora-Ledezma, E., Bossard, C., Pérez-Ramos, I. M., y Roumet, C. (2014). Measurement of fine root tissue density: A comparison of three methods reveals the potential of root dry matter content. *Plant and Soil*, 374(1–2), 299–313. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1874-y>
- Bolaños González, M. A., Pellat, F. P., Gaistardo, C. O. C., Espinoza, J. A. A., Romero, V. M., De, J. C., y Cabrera, C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271–288.
- Brown, K. J. (1976). Estimating shrub biomass from basal stem diameters. *Canadian Journal of Forest Research*, 6(2), 153–158. <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/x76-019>

- Bukovsky-Reyes, S., Isaac, M. E., y Blesh, J. (2019). Effects of intercropping and soil properties on root functional traits of cover crops. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 285(July), 106614. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106614>
- Bullock, J. M., Dhanjal-Adams, K. L., Milne, A., Oliver, T. H., Todman, L. C., Whitmore, A. P., y Pywell, R. F. (2017). Resilience and food security: rethinking an ecological concept. *Journal of Ecology*, 105(4), 880–884. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12791>
- Castellanos-Morales, G., Paredes-Torres, L. M., Gámez, N., Hernández-Rosales, H. S., Sánchez-de la Vega, G., Barrera-Redondo, J., ... Eguiarte, L. E. (2018). Historical biogeography and phylogeny of Cucurbita: Insights from ancestral area reconstruction and niche evolution. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 128, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.07.016>
- Comas, L. H. y Eissenstat D. M. (2004). Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. *Functional Ecology*. 18(3):388–397.
- CONABIO. (2012). Ficha técnica de *Cucurbita pepo pepo*. En Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados. Consultado en octubre de 2019. Recuperado de [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20870\\_sg7.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20870_sg7.pdf)
- Coussy, S., Grangeon, S., Bataillard, P., Khodja, H., Maubec, N., Faure, P., ... Dagois, R. (2017). Evolution of iron minerals in a 100 years-old Technosol. Consequences on Zn mobility. *Geoderma*, 290, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.009>
- Dalle Fratte, M., Brusa, G., Pierce, S., Zanzottera, M., y Cerabolini, B. E. L. (2019). Plant trait variation along environmental indicators to infer global change impacts. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 254(December 2018), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.12.004>
- Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., ... Gorné, L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., y Grêt-Regamey, A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94(June), 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
- Ebel, R., Pozas Cárdenas, J. G., Soria Miranda, F., y Cruz González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Revista Terra Latinoamericana*, 35(2), 149. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i2.166>
- Eguiarte, L. E., Equihua, C., Espinosa-Asuar, L. (2017). La milpa es un espejo de la biodiversidad biológica y cultural de México. En: *La Ciencia de la Milpa*. Oikos=, Instituto de Ecología. UNAM. 17(1)., 7-9.
- El-Hendawy, S. E., Hu, Y., Sakagami, J. I., & Schmidhalter, U. (2011). Screening Egyptian wheat genotypes for salt tolerance at early growth stages. *International Journal of Plant Production*, 5(3), 283–298. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.740>

Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., ... Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>

Escalante, E., Yolanda, I., Escalante, E., Alberto, J., Rodríguez, G., y Teresa, M. (2016). Productividad del cultivo de calabaza en (*Cucurbita pepo* L.) Chilpancingo, Guerrero, México. *Foro de Estudios Sobre Guerrero*, 2(3), 127–130.

Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, J. J., Navarro-Garza, H., y Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813–831. Recuperado de: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2017/nov-dic/art-1.pdf%0Ahttp://www.redalyc.org/pdf/302/30253817001.pdf>

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.

Fageria, N. K., y Moreira, A. (2011). The Role of Mineral Nutrition on Root Growth of Crop Plants. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 110). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385531-2.00004-9>

FAO. (2008). Base referencial mundial del recurso suelo (Vol. 03). Recuperado de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30044a.html>

FAO. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia.

FAO. (2019). Nutrients and Soil Fertility Management. Sustainable Agriculture Platform Pilot Website. Consultado en octubre, 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/tc/exact/sustainable-agriculture-platform-pilot-website/nutrients-and-soil-fertility-management/en/>

Fonseca, W., Alice, F. y María Rey, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Boque* 30(1): 36-47.

Fort, F., Jouany, C., y Cruz, P. (2013). Root and leaf functional trait relations in Poaceae species: Implications of differing resource-acquisition strategies. *Journal of Plant Ecology*, 6(3), 211–219. <https://doi.org/10.1093/jpe/rts034>

Fourvel, G. J., Vidal-Beaudet, L., Le Bocq, A., They, F., Brochier, V., y Cannavo, P. (2018). Fertility of Technosols constructed with dam sediments for urban greening and land reclamation. *Journal of Soils and Sediments*, (July), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2077-1>

- Freschet, G. T., Cornelissen, J. H. C., van Logtestijn, R. S. P., y Aerts, R. (2010). Evidence of the “plant economics spectrum” in a subarctic flora. *Journal of Ecology*, 98(2), 362–373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01615.x>
- Furbank, R. T., Jimenez-Berni, J. A., George-Jaeggli, B., Potgieter, A. B., & Deery, D. M. (2019). Field crop phenomics: enabling breeding for radiation use efficiency and biomass in cereal crops. *New Phytologist*. <https://doi.org/10.1111/nph.15817>
- Game, I., Primus, R., 2015. GSDR 2015 Brief: Urban Agriculture End Hunger, Achieve Food Food Security and Improved Nutrition and Promote Sustainable Agriculture.
- García, Y., y Ramírez, W. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso Soil quality indicators: A new way to evaluate this resource. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138.
- Gong, L., Paris, H. S., Nee, M. H., Stiff, G., Pachner, M., Vollmann, J., y Lelley, T. (2012). Genetic relationships and evolution in *Cucurbita pepo* (pumpkin, squash, gourd) as revealed by simple sequence repeat polymorphisms. *Theoretical and Applied Genetics*, 124(5), 875-891. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1752-z>
- Gong, X., Li, S., Sun, X., Wang, L., Cai, L., Zhang, J., y Wei, L. (2018). Green waste compost and vermicompost as peat substitutes in growing media for geranium (*Pelargonium zonale* L.) and calendula (*Calendula officinalis* L.). *Scientia Horticulturae*, 236(March), 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.051>
- González-Barrios, José Luis, González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369–377. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792011000400369&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400369&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- 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.
- Hafeez, F. (2013). Characterization of microbial communities in Technosols constructed for industrial wastelands restoration. (Tesis Doctoral). Université de Bourgogne. Agricultural Sciences.
- Hajek, P., Hertel, D., y Leuschner, C. (2013). Intraspecific variation in root and leaf traits and leaf-root trait linkages in eight aspen demes (*populus tremula* and *p tremuloides*). *Frontiers in Plant Science*, 4(OCT), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00415>
- Hendrik, P., Ülo, N., Lourens, P., Ian, J. W., y Rafael, V. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3), 565–588. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Hernández-Correa, E. (2015). Efecto de la aplicación exógena del ácido giberélico y del ácido jasmónico sobre la síntesis de terpenos en *Lippia graveolens* Kuhn. Tesis de

Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Páginas 1-58

Himmelbauer, M. (2004). Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems. *Plants and Soil*.260: 11-120.

Holdaway, R. J., Richardson, S. J., Dickie, I. A., Peltzer, D. A., y Coomes, D. A. (2011). Species- and community-level patterns in fine root traits along a 120000-year soil chronosequence in temperate rain forest. *Journal of Ecology*, 99(4), 954–963. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01821.x>

Isaac, M. E., Martin, A. R., Filho, E. de M. V., Rapidel, B., Roupsard, O., y Van den Meersche, K. (2017). Intraspecific trait variation and coordination: Root and leaf economics spectra in coffee across environmental gradients. *Frontiers in Plant Science*, 8(July), 1–13. <https://doi.org/10.338>

Isbell, F., Adler, P. R., Eisenhauer, N., Fornara, D., Kimmel, K., Kremen, C., ... Scherer-Lorenzen, M. (2017). Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology*, 105(4), 871–879. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.127899/fpls.2017.01196>

Islam, A. K. M. S., Edwards, D. G., y Asher, C. J. (1980). pH optima for crop growth - Results of a flowing solution culture experiment with six species. *Plant and Soil*, 54(3), 339–357. <https://doi.org/10.1007/BF02181830>

Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., y Soil Science Society of America. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61. Retrieved from <http://naldc.nal.usda.gov/catalog/16713>

Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tiftonell, P., Smith, P., Cerdà, A., ... Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. *Soil*, 2(2), 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>

Kirkby, C. *et al.* (2011) Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*. 163, 197–208.

Kong, D., Wang, J., Wu, H., Valverde-Barrantes, O. J., Wang, R., Zeng, H., ... Feng, Y. (2019). Nonlinearity of root trait relationships and the root economics spectrum. *Nature Communications*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10245-6>

Kramer-Walter, K. R., Bellingham, P. J., Millar, T. R., Smissen, R. D., Richardson, S. J., y Laughlin, D. C. (2016). Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum. *Journal of Ecology*, 104(5), 1299–1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12562>

Lira-Saade, R., Euguiarte, F., L.; M.H., S. 2009. Proyecto Recopilación y Análisis de la Información existente de las especies de los géneros *Cucurbita* y *Sechium* que crecen y/o se cultivan en México. CONABIO. pp.107.

- Lv, B., Zhang, D., Cui, Y., y Yin, F. (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>
- Mahmoud, A., y Grime, J. P. (1976). An analysis of competitive ability in three perennial grasses. *New Phytologist*, 77, 431–435.
- Mandal, S., Donner, E., Smith, E., Sarkar, B., y Lombi, E. (2019). Biochar with near-neutral pH reduces ammonia volatilization and improves plant growth in a soil-plant system: A closed chamber experiment. *Science of The Total Environment*, 697, 134114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134114>
- Martin, A. R., Hayes, F. J., Borden, K. A., Buchanan, S. W., Gordon, A. M., Isaac, M. E., y Thevathasan, N. V. (2019). Integrating nitrogen fixing structures into above- and belowground functional trait spectra in soy (*Glycine max*). *Plant and Soil*, 53–69. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04058-1>
- Martin, A. R., y Isaac, M. E. (2015). Plant functional traits in agroecosystems: A blueprint for research. *Journal of Applied Ecology*, 52(6), 1425–1435. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12526>
- Martinez, C. F., Cavagnaro, J. B., Roig Juñent, F. A., & Cantón, M. A. (2013). Respuesta al déficit hídrico en el crecimiento de forestales del bosque urbano de Mendoza: Análisis comparativo en árboles jóvenes. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 45(2), 47–64.
- Martínez-Valdivieso, D. (2014). Mejora genética del cultivo de calabacín: incremento del valor añadido mediante la obtención de variedades con mayor calidad sensorial y nutricional. Tesis Doctoral. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Universidad de Córdoba.
- Martínez-Valdivieso, D., Font, R., Gómez, P., Blanco-Díaz, T., & Del Río-Celestino, M. (2014). Determining the mineral composition in Cucurbita pepo fruit using near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(15), 3171–3180. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6667>
- Martín-Robles, N., Morente-López, J., Freschet, G. T., Poorter, H., Roumet, C., y Milla, R. (2019). Root traits of herbaceous crops: Pre-adaptation to cultivation or evolution under domestication? In *Functional Ecology* (Vol. 33). <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13231>
- Maximillian, J., Brusseau, M. L., Glenn, E. P., y Matthias, A. D. (2019). Pollution and Environmental Perturbations in the Global System. In *Environmental and Pollution Science* (3rd ed.). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00025-2>
- McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., ... Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505–518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>



- McGrath, J. M., Spargo, J., y Penn, C. J. (2014). Soil Fertility and Plant Nutrition. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 166–184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00249-7f>
- Méndez-López, A., Villanueva-Verduzco, C., Sahagún-Castellanos, J., Avitia-García, E., Colinas-León, T., Jamilena-Quesada, M., & Rojas-Martínez, R. I. (2010). Obtención, caracterización y agrupamiento de genotipos partenocárpicos de calabaza (*Cucurbita pepo* L.) cultivar “round zucchini.” *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 16(2), 123–131.
- Meng, Z., Duan, A., Chen, D., Dassanayake, K. B., Wang, X., Liu, Z., ... Gao, S. (2017). Suitable indicators using stem diameter variation-derived indices to monitor the water status of greenhouse tomato plants. *PLoS ONE*, 12(2), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171423>
- Mommer, L., y Weemstra, M. (2012). The role of roots in the resource economics spectrum. *New Phytologist*, 195(4), 725–727. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04247.x>
- Moncada de la Fuente, J., Anaya Garduño, M., Ortiz Solorio, C., Sánchez García, P., y Chacón Rodríguez, J. (2013). Suelo: Protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Postgraduados, 1a edición. pp. 24. Recuperado de: <http://www.redinnovagro.in/documentosinnov/suelos.pdf>
- Muñoz-Iniestra, D. J., López, G. F., Hernández, M. M., Soler, A. A., & J., L. G. (2009). Impacto De La Pérdida De La Vegetación Sobre Las Propiedades De Un Suelo Aluvial. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 237–246.
- Navas, M. L., Roumet, C., Bellmann, A., Laurent, G., y Garnier, E. (2010). Suites of plant traits in species from different stages of a Mediterranean secondary succession. *Plant Biology*, 12(1), 183–196. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00208.x>
- Nguyen, T. T. N., Wallace, H. M., Xu, C. Y., Xu, Z., Farrar, M. B., Joseph, S., ... Bai, S. H. (2017). Short-term effects of organo-mineral biochar and organic fertilisers on nitrogen cycling, plant photosynthesis, and nitrogen use efficiency. *Journal of Soils and Sediments*, 17(12), 2763–2774. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1839-5>
- NOM-027-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación, México. 5 de enero de 1995. Nomenclatura reformada, Diario Oficial de la Federación, México a 23 de abril de 2003.
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Löhmus, K., ... Brunner, I. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems*, 141(3), 426–442. <https://doi.org/10.1080/11263500701626069>
- Pagliai, M. (2010). The Soil Pore System as an Indicator of Soil Quality. Instituto sperimentale per lo studio e la difesa del suolo. Firenze, Italia. College on Soil Physics. 2163(3).
- Pan, F., Liang, Y., Wang, K., y Zhang, W. (2018). Responses of fine root functional traits to soil nutrient limitations in a karst ecosystem of southwest China. *Forests*, 9(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/f9120743>

Passioura, J. B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment*, 25(3), 311–318.

Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., y Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science y Health*, 5, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>

Pérez Fernández, A. R., Ruiz Morales, M., Lobato Calleros, M. O., Valera, E. P., & Rodríguez Salinas, P. (2018). Sustrato Biofísico Para Agricultura Protegida Y Urbana A Partir De Compost Y Agregados Provenientes De Los Residuos Sólidos Urbanos. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(3), 383–394. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.02>

Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167–234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>

Petersen, K. S., Ares, A., Terry, T. A., y Harrison, R. B. (2008). Vegetation competition effects on aboveground biomass and macronutrients, leaf area, and crown structure in 5-year old Douglas-fir. *New Forests*, 35(3), 299–311. <https://doi.org/10.1007/s11056-007-9078-z>

Piperno, D. R., y Stothert, K. E. (2003). Phytolith Evidence for Early Holocene. *Science*, 299(February), 1054–1057.

Poorter, H., van de Vijver, C. A. D. M., Boot, R. G. A., y Lambers, H. (1995). Growth and carbon economy of a fast-growing and a slow-growing grass species as dependent on nitrate supply. *Plant and Soil*, 171(2), 217–227. <https://doi.org/10.1007/BF00010275>

Poorter, H., y Garnier, E. (1996). Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods. *Journal of Experimental Botany*, 47(9), 1343–1351. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.9.1343>

Prieto, I., Roumet, C., Cardinael, R., Dupraz, C., Jourdan, C., Kim, J. H., ... Stokes, A. (2015). Root functional parameters along a land-use gradient: Evidence of a community-level economics spectrum. *Journal of Ecology*, 103(2), 361–373. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12351>

Prometheus Wiki: Protocols in ecological y environmental plant physiology. Página en red: <http://prometheuswiki.org/tiki-index.php?page=Morphology> . Consultado en: septiembre de 2019. Última actualización: 19 de mayo de 2013.

Qi, Y., Wei, W., Chen, C., y Chen, L. (2019). Plant root-shoot biomass allocation over diverse biomes: A global synthesis. *Global Ecology and Conservation*, 18(18), e00606. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00606>

R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. ver. 3.5.3 “Feather-Spray” (2019).

Reich, P. B. (2014). The world-wide “fast-slow” plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102(2), 275–301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>

Rokia, S., Sere, G., Deeb, M., Fournier, F., y Nehls, T. (2014). Fertility of Technosols constructed with urban wastes. *16(2013)*, 11583.

Rosset, P., Altieri, M. (2018). *Agroecología: Ciencia y Política*. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA). 3ª edición, Riobamba, Ecuador.

Roumet, C., Birouste, M., Picon-Cochard, C., Ghestem, M., Osman, N., Vrignon-Brenas, S., ... Stokes, A. (2016). Root structure-function relationships in 74 species: Evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. *New Phytologist*, 210(3), 815–826. <https://doi.org/10.1111/nph.13828>

Rowe, D. B., Monterusso, M. A., y Rugh, C. L. (2006). Assessment of heat-expanded slate and fertility requirements in green roof substrates. *HortTechnology*, 16(3), 471–477.

RStudio Team (2015). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

Ryser, P. (1996). The Importance of Tissue Density for Growth and Life Span of Leaves and Roots : A Comparison of Five Ecologically Contrasting Grasses Author ( s ): P . Ryser Source : *Functional Ecology* , Vol . 10 , No . 6 ( Dec . , 1996 ) , pp . 717-723 Published by: Brit. *Functional Ecology*, 10(6), 717–723.

Ryser, P., y Lambers, H. (1995). Root and leaf attributes accounting for the performance of fast- and slow-growing grasses at different nutrient supply. *Plant and Soil*, 170(2), 251–265. <https://doi.org/10.1007/BF00010478>

Salgado-Negret, B., Pulido-Rodríguez, E. N., Cabrera, M., Ruíz-Osorio, C., y Paz, H. (2016). Escalando de los rasgos funcionales a procesos poblacionales, comunitarios y ecosistémicos. En *La Ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*.

Sánchez de la Vega, G. (2017). De la cueva a la mesa, y ahora al laboratorio genómico: la diversidad de calabazas en México. En: *La Ciencia de la Milpa*. Oikos=, Instituto de Ecología. UNAM. 17(1)., 17-21.

SEMARNAT. (2002). *Aprovechamiento de la vida silvestre*. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Dirección General de Federalización y Descentralización de Servicios Forestales y de Suelo. México. [http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/07\\_Aprovechamiento/7.1\\_Recursos/index.htm](http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/07_Aprovechamiento/7.1_Recursos/index.htm)

SEMARNAT. (2006). Dirección General de Estadística e Información Ambiental, 2006, con base en: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Dirección General de

Inspección y Vigilancia Forestal, México, 2005; PROFEPA.

<http://www.profepa.gob.mx/PROFEPA/RecursosNaturales/Forestal/prioridades.htm>

Séré, G., Schwartz, C., Ouvrard, S., Renat, J. C., Watteau, F., Villemin, G., y Morel, J. L. (2010). Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments*, 10(7), 1246–1254. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0206-6>

Shipleyl, B., y Vu, T. (2002). Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts. *New Phytologist*, 153(2), 359–364.

Sun, J., Wang, M., Lyu, M., Niklas, K. J., Zhong, Q., Li, M., y Cheng, D. (2019). Stem diameter (and not length) limits twig leaf biomass. *Frontiers in Plant Science*, 10(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00185>

Tapia-Tapia, E. del C., y Reyes-Chilpa, R. (2008). Productos forestales no maderables en México: Aspectos económicos para el desarrollo sustentable. Mexican non-wood forest products: economic aspects for sustainable development. *95 Madera y Bosques*, 14(3), 95–112.

Tjoelker, M. G., Craine, J. M., Wedin, D., Reich, P. B., y Tilman, D. (2005). Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. *New Phytologist*, 167(2), 493–508. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01428.x>

Tyagi, A. C. (2016). Towards a Second Green Revolution. *Irrigation and Drainage*, 65(4), 388–389. <https://doi.org/10.1002/ird.2076>

Van Bodegom, P., y Price, T. (2015). A traits-based approach to quantifying ecosystem services. In J. Bouma y P. Van Beukering (Eds.), *Ecosystem Services: From Concept to Practice* (pp. 40-64). Cambridge: Cambridge University Press.  
doi:10.1017/CBO9781107477612.005

Vázquez-Solís, G. (2018). Rasgos funcionales del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) como indicadores potenciales de la calidad de suelo en agrosistemas de Guanajuato. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., y Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>

Weiner, J. (2017). Applying plant ecological knowledge to increase agricultural sustainability. *Journal of Ecology*, 105(4), 865–870. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12792>

Westoby, M., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Diemer, M., ... Cornelissen, J. H. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–827.

Westoby, M., Falster, D. S., Moles, A. T., Vesk, P. A., y Wright, I. J. (2002). Plant ecological strategies: Some leading dimensions of variation between species. *Annual*

Review of Ecology and Systematics, 33, 125–159.

<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452>

Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., ... Gulias, J. (2004). The Worldwide Leafs Economic Spectrum. *Nature*, 428(12), 821–827.

Wright, I. J., y Westoby, M. (1999). Differences in seedling growth behaviour among species: Trait correlations across species, and trait shifts along nutrient compared to rainfall gradients. *Journal of Ecology*, 87(1), 85–97. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00330.x>

Yu, L., Song, M., Lei, Y., Korpelainen, H., Niinemets, Ü., y Li, C. (2019). Effects of competition and phosphorus fertilization on leaf and root traits of late-successional conifers *Abies fabri* and *Picea brachytyla*. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.004>

Zizumbo-Villarreal, D., y Colunga-García Marín, P. (2017). La milpa del occidente de Mesoamérica: profundidad histórica, dinámica evolutiva y rutas de dispersión a Suramérica. *Revista de Geografía Agrícola*, (58), 33–46. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2017.58.001>