



## Facultad Regional Multidisciplinaria, FAREM-ESTELÍ

Efectos del Biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.

### Trabajo monográfico para optar

al grado de

### Ingeniero Ambiental

#### Autores

Br. Jomara Mabet González Zamora

Br. Rosa Emilia López Cruz

Br. Tomas Uriel Gutiérrez Cruz

#### Tutor

MSc. Oscar Rafael Lanuza Lanuza

Estelí, 17 febrero, 2020



### CARTA AVAL DEL TUTOR

A través de la presente hago constar que: **Jomara Mabet González Zamora, Rosa Emilia López Cruz, Tomas Uriel Gutiérrez Cruz**, estudiantes de la carrera Ingeniería Ambiental, han presentado en defensa e incorporado las sugerencias realizadas por el jurado examinador del trabajo monográfico titulado **"Efectos del Blochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados"** para optar al grado de Ingeniero Ambiental.

Por consiguiente, valoro que este trabajo cumple con los requisitos establecidos en el Reglamento de Régimen Académico Estudiantil Modalidades de Graduación.

Dado en la ciudad de Esteli a los 13 días de marzo del 2020

Atentamente,



---

**MSc. Oscar Rafael Lanuza Lanuza**  
**Tutor de Monografía**  
**UNAN Managua – FAREM Esteli**

## **DEDICATORIA**

*Gracias principalmente a Dios por ser el dador de la vida, y el dueño de la sabiduría. Por proporcionarnos siempre la luz en el túnel de las metas, sueños y todos nuestros planes profesionales a cumplir.*

*A nuestros padres por siempre ser nuestro manual a seguir, amigos y familia en general, nuestros docentes por compartir sus conocimientos para así ser personas de bien que contribuyamos al cambio de nuestra nación y ante la sociedad.*

## AGRADECIMIENTO

*Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.*

*A nuestra universidad FAREM Estelí por velar por los intereses de sus estudiantes y hacernos profesionales de bien a la sociedad.*

*Gracias a nuestros padres:*

*Eduardo González, Emilia Zamora, Porfirio Andrés López Castro, Cándida Rosa Cruz, Aracely Leonor Gutiérrez, Por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por sus consejos, valores y principios que nos han inculcado.*

*A nuestros docentes por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra preparación profesional. De manera muy especial a MSc. Leana del Socorro Espinoza Corrales y MSc. Julio Castillo, por su apoyo incondicional e instarnos a seguir adelante desde el principio de nuestra formación, a nuestro tutor de trabajo de investigación MSc. Oscar Rafael Lanuza quien ha guiado con paciencia y rectitud como docente.*

*A nuestra familia y amigos, que siempre estuvieron presentes y nos brindaron ese apoyo incondicional a lo largo de nuestra formación profesional.*

## RESUMEN

El biochar o carbón vegetal como enmienda de suelo tiene gran potencial para su incorporación en las prácticas de restauración paisajes degradados. Sin embargo, pocos estudios han probado sus efectos con más de dos especies y mucho menos con dosis múltiples y con especies de bosques secos tropicales. En este estudio se evaluó el efecto del biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados. Las especies evaluadas fueron: *Cedrela odorata* L (Meliaceae), *Swietenia humilis* Zucc (Meliaceae), *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Bignoniaceae), *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (Boraginaceae), *Guazuma ulmifolia* Lam (Malvaceae), *Crescentia alata* (Bignoniaceae). Una planta por bolsa con 20 repeticiones de cada tratamiento fue usada en un diseño completamente aleatorizado (20 repeticiones x 6 especies x 5 dosis, n = 600). Las dosis de biochar aplicadas fueron: control, 0.25%, 5%, 10% y 20% en función del volumen de las bolsas. Las plantas fueron regadas a capacidad de campo una vez por semana y permanecieron en vivero durante 100 días. Se encontró diferencias significativas en altura, diámetro al cuello de raíz, índice de esbeltez, peso de seco de raíz, tallo, hoja y sus respectivas fracciones, índice de contenido de clorofila, índice de lignina y el índice de calidad de Dickson entre especies y por efecto del biochar (interacción especies\*tratamiento). La especie que mejor respondió a todos los tratamientos y presentó los valores más altos en la mayoría de las variables fue *G. ulmifolia*, seguido de *C. alata* y *C. odorata*. Las plántulas produjeron mayor biomasa seca de tallo, hoja y total en suelo con 2.5% de biochar, mientras que produjeron mayor biomasa de raíz en el tratamiento de 10% biochar. Estos resultados coinciden con el hecho de que el biochar como enmienda de suelo tiene un gran potencial para ser usados en las prácticas de restauración ecológica de suelos degradados.

**Palabras claves:** Restauración, Bosque seco, Biochar, Dickson, Suelos degradados, Biomasa.

## Índice general

CAPÍTULO I .....	1
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
III. JUSTIFICACIÓN .....	2
IV. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN .....	3
4.1. Objetivo General.....	3
4.2. Objetivos Específicos: .....	3
CAPITULO 2 .....	4
V. MARCO REFERENCIAL .....	4
5.1. Antecedentes .....	4
5.2. El biochar .....	4
5.3. Procesos de producción del biochar.....	6
5.4. Características del biochar .....	6
5.5. Efectos de biochar sobre las propiedades del suelo .....	6
5.6. Efectos del biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de plántulas .....	8
5.7. Ecofisiología de plántulas, atributos morfológicos y la calidad de plántulas (esbeltez y Índice de Dickson) y su relación con el establecimiento en campo. ....	9
VI. HIPOTESIS O PREGUNTAS DIRECTRICES .....	12
CAPÍTULO 3 .....	12
VII. DISEÑO METODOLÓGICO .....	12
7.1. Ubicación del área de estudio .....	12
7.2. Tipo de estudio.....	12
7.3. Diseño experimental .....	13
7.3.1. Selección de especies, colección de semillas y germinación .....	13
7.3.2. Obtención del biochar .....	13
7.3.3. Preparación del suelo .....	14
7.3.4. Determinación de la capacidad de campo .....	14
7.3.5. Aplicación de los tratamientos .....	15
7.3.6. Colecta de datos .....	16
7.3.7. Análisis estadístico.....	16
CAPÍTULO IV .....	18
VIII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	18
8.1. Comprobar los efectos de biochar sobre las características morfológicas de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.....	18

8.2. Determinar el efecto del biochar sobre el índice de Lignina (IL) e Índice de Clorofila (ICC) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.....	28
8.3. Construir curvas dosis-respuestas de las principales variables morfológicas de plántulas de las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.....	32
8.4. Determinar el efecto del Biochar sobre el Índice calidad de Dickson (ICD) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados..	34
CAPÍTULO V.....	35
IX. CONCLUSIONES.....	35
X. RECOMENDACIONES.....	36
XI. Bibliografía.....	37
XII. ANEXOS.....	40

## Índice de figuras

Figura 1. Modelo conceptual del biochar .....	5
Figura 2. Temperatura interna del reactor alcanzada durante el proceso de pirolisis. Fuente elaboración propia. ....	14
Figura 3. Efectos de biochar sobre la altura de las plántulas .....	19
Figura 4. Efectos del biochar sobre el diámetro al cuello de la raíz.....	20
Figura 5. Efectos del biochar sobre el índice de robustez o esbeltez de las plántulas .....	21
Figura 6. Efectos del biochar sobre el peso seco de la raíz de las plántulas.....	22
Figura 7. Efectos del biochar sobre el peso seco del tallo de las plántulas .....	23
Figura 8. Efectos del biochar sobre el peso seco de la hoja de las plántulas.....	24
Figura 9. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco de raíz de las plántulas .....	25
Figura 10. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco del tallo de las plántulas .....	26
Figura 11. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco de la hoja de las plántulas .....	27
Figura 12. Efectos del biochar sobre el largo de la raíz de las plántulas .....	28
Figura 13. Efectos del biochar sobre el índice de lignina de las plántulas .....	29
Figura 14. Efecto del biochar sobre el índice de contenido de clorofila de las plántulas .....	31
Figura 15. Curvas dosis respuestas de los principales rasgos morfológicos de las seis especies bajo diferentes dosis de biochar. ....	32
Figura 16. Efectos del biochar sobre el índice de Dickson de las plántulas .....	34

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de las especies seleccionadas para el experimento. ....	11
Tabla 2. Descripción de las variables medidas durante el experimento .....	15
Tabla 3. Matriz de operacionalización de variables e indicadores .....	17



# CAPÍTULO I

## I. INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo en Centroamérica es un fenómeno agravado por el cambio climático, que perturba el establecimiento de plantas forestales y afecta la disponibilidad de agua, causada por sequías extremas. La aplicación del biochar es una posibilidad para combatir la pérdida de fertilidad del suelo, y mejorar la calidad del mismo; presentando condiciones óptimas para la producción de plántulas con excelentes características morfológicas y fisiológicas que permitan su sobrevivencia en campo.

El bosque neotropical de Centroamérica, presenta una alta degradación por las diferentes actividades antropogénicas que incluyen el uso irracional del recurso, ya sea para la extracción de leña o la industria. Existen diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas para la restauración del bosque como es el biochar, que es un subproducto obtenido de los diferentes tipos de biomasa por medio de un proceso de pirolisis, en donde su aporte influye en los efectos en las diversas características morfológicas y fisiológicas de las plantas que tienen un destino para la reforestación, y de esta manera determinar su capacidad de sobrevivencia en campo.

En Nicaragua existe el 1% de bosque seco dado a la gran deforestación que se ha venido dando en el transcurso del tiempo, por ende, surge la necesidad de restaurar estas áreas degradadas mediante la producción de plántulas con características óptimas morfológicas y fisiológicas que cumplan su vivencia en campo.

Existen diversos estudios en los que se muestran los beneficios que genera la aplicación del biochar sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las que incluyen una mejor retención de agua, aumento de la porosidad del suelo, regulación de pH, y mayor disponibilidad de nutrientes, lo que conlleva a prestar las condiciones óptimas para el excelente desarrollo de las plantas, que tenga gran influencia sobre sus características morfológicas y fisiológicas que permitan su establecimiento en zonas adversas con una adaptabilidad eficiente.

En Nicaragua, las investigaciones referentes a los efectos del biochar sobre las características morfológicas y fisiológicas de plantas forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados son casi nulas, por ende, la presente investigación evalúa el biochar que se obtuvo a partir del proceso de pirolisis de leña de *Acacia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Benth para conocer los efectos que este tiene sobre el desarrollo de plantas forestales.

Esta investigación es de gran importancia para los tomadores de decisiones en la región, como una estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático, ya que provee aportes sobre la alternativa del uso del biochar para la restauración de suelos degradados a

través del establecimiento de plantas forestales capaces de sobrevivir en condiciones de bosque seco.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Nicaragua al igual que los demás países centroamericanos cuenta con problemas ambientales, entre ellos la más común pérdida de bosques, especies de árboles forestales y animales.

Actualmente lo poco que queda en Nicaragua de bosque seco; la mayor parte la encontramos en el pacífico del país, en los últimos años el cambio climático ha sido el factor principal que contribuye a la pérdida de especies de plantas debido a que algunas especies carecen de resistencia a sequías o suelos secos. Cada vez las áreas quedan desérticas a causa de las malas obras del ser humano explotando los pocos árboles que quedan en los bosques secos para satisfacer sus necesidades económicas y de recurso.

Se requiere de especies de plantas que sean resistente a las sequías para poder recuperar estos bosques y cubrir áreas desérticas lo que nos llevó a estudiar el comportamiento de seis especies de plantas forestales producidas con diferente dosis de biochar y sobrevivencia ante sequías

## **III. JUSTIFICACIÓN**

En nuestro país cada vez los suelos degradados son más, y hay pocos aportes por parte de las instituciones sobre esta problemática. El CATIE ha realizado estudios sobre tecnologías para la producción de biochar a través de las cocinas mejoradas (Aker Narváez, 2014), esta alternativa propone el uso de la energía proveniente de leña para cocinar y a la vez hacer la utilización de los residuos del material combustionado como es el carbón pero, no es lo suficiente para contrarrestar los daños que sufren los bosques y los suelo, por esta razón realizamos estudios sobre especies forestales resistente a las sequías.

El presente trabajo pretende aportar resultados de estudio acerca de los efectos de aplicación de biochar en sustrato para la producción de especies forestales en invernaderos y analizar sus comportamientos de crecimiento y sobrevivencia.

La obtención del biochar, resulta ser una buena alternativa para la producción de plantas con potencial uso para la restauración de suelos degradados, puesto que la materia prima para su proceso de elaboración, es de residuos forestales, agrícolas e industrias maderera. En Nicaragua, actualmente a este tipo de biomasa se les da un uso no muy aprovechable, siendo utilizados para consumo doméstico o simplemente desechados. Desde el punto de vista ecológico, todo residuo que pueda ser aprovechado para la producción de biochar,

ayuda a la disminución de costos a la hora de producir las plantas con potencial uso para la restauración de suelos degradados, influyendo de manera positiva en las diferentes variables morfológicas que determinan su calidad, dando como resultado plantas con alta capacidad de sobrevivencia en campo.

A este estudio fueron sometidas seis especies forestales con potencial uso para suelos degradados. Las especies son: Jicaro (*Crescentia alata*), Cedro (*Cedrela odorata*), Caoba (*Swietenia humilis*), Laurel (*Cordia alliodora*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Guácimo (*Guazuma ulmifolia*).

## **IV. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto del biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.

### **4.2. Objetivos Específicos:**

1. Comprobar los efectos de biochar sobre las características morfológicas de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.
2. Determinar el efecto del biochar sobre el índice de Lignina (IL) e Índice de Clorofila (ICC) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.
3. Calcular las curvas dosis-respuestas de las principales variables morfológicas de plántulas de las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.
4. Determinar el efecto del biochar sobre el Índice Calidad de Dickson (ICD) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.

## **CAPITULO 2**

### **V. MARCO REFERENCIAL**

#### **5.1. Antecedentes**

La generación del biochar y su aplicación ha sido poco estudiada en países centroamericanos. En México se han realizado algunas investigaciones relevantes acerca del biochar, como base para hacer estudios a nivel de laboratorio, invernadero y campo, que permitió verificar su eficacia como mejorador de suelo.

Existe una gran cantidad de literaturas sobre el tema del biochar, sin embargo, se tomó información de investigaciones originales que le dieron principales aportes a nuestro tema (Lehmann & Joseph, 2009). A pesar de la gran disponibilidad de información de biochar, no se encuentran datos suficientes de los efectos de este, sobre crecimiento y sobrevivencia de más de dos especies forestales.

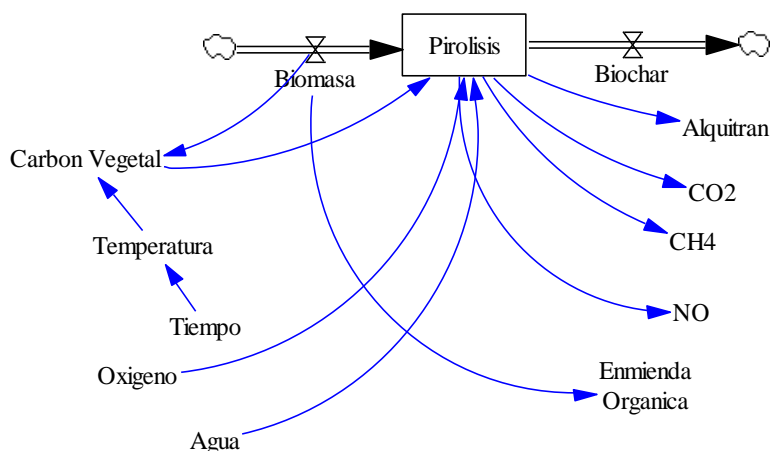
Atendiendo los efectos conocidos del biochar sobre suelo y planta en Nicaragua, algunos de los aspectos que han sido estudiados son: el uso del biochar como enmienda al suelo en los rendimientos de maíz en tres municipios de Nicaragua (Aker Narváez, 2014), la evaluación de seis sustratos de biochar y dos sustratos crudos en suelos agrícolas y de bosque y su efectos en plantas de maíz y frijol (Diana, Jesrel, Karen, 2015), y los efectos de la aplicación del biocarbon, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características de suelos en rendimientos de maíz en tres texturas de suelo, de León, Nicaragua (Aker Narváez, 2014).

En Nicaragua, las investigaciones referentes a los efectos del biochar sobre las características morfológicas y fisiológicas de plantas forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados son casi nulas, por ende la presente investigación evalúa el biochar que se obtuvo a partir del proceso de pirolisis de leña de Acacia y Carbón para conocer los efectos que tiene en el desarrollo de plantas forestales.

#### **5.2. El biochar**

La palabra inglesa biochar (en castellano el término todavía no reconocido por la RAE sería biocarbón, por lo que de aquí en adelante se ha utilizado el sustantivo en inglés) es un término de reciente aparición y se refiere a un producto de grano fino y poroso similar en apariencia al carbón vegetal. Se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante la técnica denominada pirolisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado.

Según Lehmann and Joseph (2009), proponen en su definición la particularidad de denominar al material pirolizado como biochar cuando su destino es la de aplicación como enmienda orgánica de suelos y para el secuestro de carbono en el mismo, siendo estos últimos aspectos de gran importancia, ya que se descarta el uso de biochar como combustible. De esta forma, se destaca su origen biológico y se diferencia del tradicional carbón vegetal destinado a combustible.



**Figura 1. Modelo conceptual del biochar**

El término biochar no solo hace referencia al uso de materia orgánica carbonizada en los suelos agrícolas, sino también a su uso para la recuperación de suelos contaminados, entre otras aplicaciones ambientales (Edenborn, Edenborn, Krynock, & Haug, 2015). Es importante resaltar que este término hace énfasis en su origen biológico, lo cual lo distingue de otros productos carbonizados producidos a partir de plásticos y diversos materiales no biológicos.

Los estudios actuales sobre el biochar se inspiran en la forma en que los indígenas de la Amazonía manipulaban el suelo mediante carbón vegetal. Los estudios muestran que el manejo de biochar aumenta significativamente la productividad de los cultivos y reduce la lixiviación de los nutrientes (Lehmann & Rondon, 2006).

Entre los beneficios del biochar se encuentran: retención de nutrientes y capacidad de intercambio catiónico, reducción de la acidez del suelo, reducción de la captación de toxinas, mejora de la estructura, uso eficiente de los nutrientes, mayor capacidad de retención de agua, disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

### **5.3. Procesos de producción del biochar**

La pirolisis se define como un proceso térmico mediante el cual el material orgánico se descompone, por la acción del calor en una atmósfera deficiente de oxígeno, y se transforma en una mezcla de hidrocarburos, gases combustibles, residuos de carbón y agua.

Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirolisis son complejas y dependen en gran medida de la naturaleza de la biomasa inicial y de las condiciones de pirolisis (temperatura, presión y tiempo de residencia del material en el reactor).

Los biochar pueden obtenerse a partir de un amplio rango de materiales (residuos agrícolas y forestales, estiércoles, residuos urbanos, lodos de aguas residuales, etc.), cuyas características van a determinar las propiedades fisicoquímicas del biochar producido. Las condiciones de pirolisis pueden originar biochar con diferentes características pese a ser obtenidos a partir de un mismo tipo de material. En general, a medida que aumenta la temperatura de pirolisis disminuye el rendimiento de producción de biochar, pero este se compone por C en estructuras aromáticas más condensada (más estable a la degradación), además, suelen presentar mayor área superficial y contenido de cenizas, y un pH más alcalino.

### **5.4. Características del biochar**

Las características de cada biochar pueden variar considerablemente dependiendo del material de partida y de las condiciones de pirolisis, sin embargo, los biochar comparten una serie de características comunes que se detallan a continuación.

Los biochar poseen un contenido elevado de C, recalcitrante en su mayor parte condensado en anillos aromáticos lo que le confiere su elevado potencial de secuestro de carbono. También cabe destacar la presencia de nutrientes asociados a su fracción mineral (K, Ca, Mg, P, S). La mayoría de los biochar son alcalinos ( $\text{pH} > 7$ ) y dependiendo de la dosis aplicada al suelo, pueden ejercer un efecto de encalado sobre el mismo.

En general los biochar son materiales porosos, poco densos, y caracterizados por una elevada área superficial específica. Esta propiedad determina la reactividad y la capacidad del biochar para retener iones en su superficie.

### **5.5. Efectos de biochar sobre las propiedades del suelo**

Una de las ventajas del uso del biochar como enmienda del suelo es que el C puede ser almacenado durante cientos de años, dada la estabilidad del biochar, mejorando el crecimiento de las plantas y el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann & Rondon, 2006). No obstante, se ha encontrado que existe otra fracción del biochar que no sería estable a largo plazo (Sohi, Lopez-Capel, Krull, & Bol, 2009), de este modo se ha sugerido que el biochar estaría formado por componentes estables y otros que, en cambio, serían

degradables. Faltan estudios que investiguen acerca de la estabilidad del biochar a corto y largo plazo bajo suelos y climas diferentes. Las condiciones de combustión, así como las características de la materia prima utilizada en la producción de biochar, serían los aspectos que determinarían la proporción de componentes relativamente lábiles en el biochar, sin olvidar los objetivos principales que se planteen para el proceso de pirólisis: obtención de energía o biochar, ya que también influiría sobre la estabilidad del biochar producido al ser éste de diferentes características en función del tipo de pirólisis (Sohi et al., 2009).

Otros aspectos estudiados son el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en parte por la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua (Fowles, 2007; Glaser, Guggenberger, & Zech, 2001). Dichos estudios también hablan de la capacidad de este material para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Major, 2011).

Atendiendo al efecto de enmienda orgánica que produce la aplicación del biochar en suelos, la reducción en la densidad aparente y el aumento de materia orgánica permitirían reducir el laboreo mecánico. Además, también se reducirían costes en irrigación debido al aumento en la capacidad de retención de agua. En este sentido, Glaser et al. (2001) encontró en suelos de *terra preta* una capacidad de retención de agua superior en un 18% en comparación a los suelos adyacentes.

Por lo general, el biochar aumenta la productividad y calidad del suelo, sobre todo en suelos ácidos y pobres en nutrientes, como por ejemplo los oxisoles. En la revisión de (Sohi et al., 2009) se muestran 13 estudios de diferentes autores en los que se obtienen incrementos de productividad en los diferentes cultivos realizados. Tres son los mecanismos propuestos que tratan de explicar cómo el biochar permite aumentar la producción en cosechas: (i) por la modificación directa de la química del suelo debido a la composición del biochar, (ii) el biochar está formado por superficies químicamente activas que permiten modificar la dinámica de los nutrientes en el suelo o bien catalizan reacciones útiles para la obtención de un suelo fértil, (iii) modifica físicamente el suelo de manera que beneficia el crecimiento de las raíces y aumenta la retención de agua y nutrientes (Sohi et al., 2009).

En cuanto a beneficios en la producción y requerimiento de nutrientes, se ha encontrado que el biochar permite obtener igual rendimiento de cosecha con una dosis más baja de fertilización que aquellos cultivos en los cuales se aplica la dosis óptima de fertilización (Sohi et al., 2009). Se ha sugerido que el objetivo de aplicación de biochar en suelos de cultivos no sería tanto para aumentar la producción, sino más bien para asegurar un equilibrio de las cosechas, frente a eventos climáticos como por ejemplo sequías. Lehmann and Rondon (2006) encontraron incrementos en la absorción por plantas de P, K, Ca, Zn y

Cu en cultivos tropicales en los cuales se había aplicado biochar. La naturaleza y el mecanismo básico que explique las interacciones entre cosecha, tipo de suelo, tipo de materia prima para la producción de biochar, método de pirólisis y dosis de aplicación tiene que ser ampliamente estudiado para ganar capacidad de predicción en la aplicación de biochar en suelos, y así abrir la posibilidad de aplicación a escalas más amplias.

Por otra parte, la interacción del biochar con los fertilizantes, así como los efectos sobre la biota del suelo y sus implicaciones sobre la ecología de este son factores todavía poco conocidos y en este sentido, la investigación de los efectos de la aplicación del biochar en suelos es reciente (Lehmann et al., 2011). Las investigaciones al respecto están orientadas al estudio de la estructura física del biochar y las interacciones con microorganismos, como las micorrizas, si bien se ha encontrado variabilidad en los resultados. Algunos estudios han encontrado incrementos de la actividad microbiana en suelos enriquecidos con biochar (Steiner, 2010). Dichos estudios hacen referencia a la capacidad del biochar, debido a su estructura en microporos, para permitir el establecimiento de colonias microbianas. No obstante, se ha discutido que la biomasa microbiana no es una buena medida de la actividad de esta, lo cual genera incertidumbre en la valoración de los efectos del biochar, debido a la falta de conocimiento en cuanto a que tipo de comunidad microbiana puede verse favorecida, y lo que es más importante, el tipo de actividad que puedan realizar en el ecosistema edáfico.

### **5.6. Efectos del biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de plántulas**

El biochar adicionado al suelo puede modificar sus propiedades físicas, disminuyendo la densidad aparente y aumentando la retención de agua, debido a su alta superficie específica ( $50 - 300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) y porosidad (Kuzyakov, Subbotina, Chen, Bogomolova, & Xu, 2009). Además, el color oscuro que confiere al suelo puede favorecer la absorción de las radiaciones solares, elevando la temperatura del suelo y beneficiando la germinación de semillas y la actividad microbiana del mismo (Fig. 1) (Atkinson, Fitzgerald, & Hips, 2010).

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, se ha descrito que el biochar puede aumentar la capacidad de intercambio iónico del suelo, permitiendo retener elementos nutritivos beneficiosos para la planta (Liang et al., 2006). Así mismo, el biochar puede aumentar la actividad biológica del suelo y favorecer la formación de humus, constituyendo un hábitat idóneo para microorganismos capaces de alterar los componentes minerales del suelo y provocar pequeñas alteraciones de pH que favorezcan la liberación y asimilación de elementos nutritivos por la planta (Thies & Rillig, 2012). Las respuestas del cultivo y el suelo a la aplicación de biochar varían considerablemente dependiendo del material de origen y de las condiciones de pirólisis (Novak et al., 2009). La interacción con el clima, el tipo de suelo (textura, química, hidrología) y la fertilización pueden contribuir a aumentar la incertidumbre del modo en el que interactúa el biochar con el medio.



El grado de conocimiento es muy reciente y a menudo los resultados son muy variables y dependientes del tipo de estudio (Sohi et al., 2009). En un estudio previo (Albuquerque et al., 2013), el biochar procedente de poda de olivo ejerció efectos beneficiosos sobre un cultivo de trigo desarrollado en condiciones controladas (cámara de cultivo). Sin embargo, estos resultados deben ser corroborados en ensayos en condiciones de campo antes de adoptar la enmienda de suelos con biochar como una herramienta a gran escala.

### **5.7. Ecofisiología de plántulas, atributos morfológicos y la calidad de plántulas (esbeltez y Índice de Dickson) y su relación con el establecimiento en campo.**

**Indicadores de calidad:** Las plantas utilizadas en actividades de forestación no solo deben poseer un origen genético acorde al objetivo de la plantación y las condiciones del sitio en que serán establecidas, también deben cumplir con condiciones mínimas de calidad, entendida ésta como el conjunto de atributos que permitan garantizar su capacidad para establecerse y crecer exitosamente en terreno. Exceptuando las características genéticas, que quedan determinadas al momento de seleccionar la semilla, la calidad de las plantas está determinada en gran medida por su cultivo en vivero.

Efectivamente, los atributos morfológicos, fisiológicos y sanitarios que condicionan la calidad de las plantas pueden ser manipulados durante la etapa de vivero, de modo que esta fase resulta fundamental para obtener plantas que exhiban un satisfactorio desempeño en terreno. La experiencia señala que las plantas con distintos atributos morfológicos y fisiológicos tienen diferentes comportamientos según los factores limitantes que el sitio presente (Rodríguez, 1990). La morfología no dice todo respecto de la calidad de una planta. La condición nutricional de las mismas, medida a través de la concentración foliar de nutrientes, está muy relacionada con el comportamiento que éstas puedan exhibir en terreno.

En síntesis, la combinación de parámetros o atributos morfológicos y fisiológicos determinan la calidad de la planta, el éxito en su establecimiento y su posterior desarrollo en terreno. No obstante, los atributos morfológicos, pueden correlacionarse exitosamente con la supervivencia y el crecimiento inicial en terreno de muchas especies de uso forestal, señalándose que mientras más grande es la planta, mayor es su potencialidad de supervivencia (de AGUIAR, 1973). Por esta razón se consideran parámetros adecuados para evaluar la calidad de las plantas. A continuación, se señalan algunos atributos morfológicos e Índices de calidad, medibles al final de la temporada de producción en vivero de plantas nativas, que permitirán caracterizar en forma cuantitativa la calidad de la planta.

**Diámetro al Cuello de la Raíz (DCR):** El diámetro a la altura de cuello de la raíz es un indicador de la capacidad de transporte de agua hacia la parte aérea, de la resistencia mecánica y de la capacidad relativa de tolerar altas temperaturas de la planta. Esta variable se expresa generalmente en milímetros (mm). Arnold (1996) estableció como indicadores

de calidad de una planta la altura, el diámetro de cuello y el peso fresco de la planta, señalando que mientras mayor es el diámetro y el peso fresco de una planta, mejor será la calidad de ella.

**Altura:** La variable altura se relaciona con su capacidad fotosintética y su superficie de transpiración. Las plantas más altas pueden lidiar mejor con la vegetación competidora, aunque esto implica una buena salud fisiológica y un sistema radicular adecuado. Esta variable se expresa generalmente en centímetros (cm).

**Índice de esbeltez o robustez:** Es la relación entre la altura dividida entre el diámetro al cuello de la raíz. Es un indicador de la resistencia de la planta a la desecación por el viento, de la supervivencia y del crecimiento potencial en sitios secos.

**Índice de Calidad de Dickson (ICD):** Este Índice integra la relación entre la masa seca total de la planta (g) y la suma del Índice de esbeltez (**IE**) y la relación parte seca aérea/parte seca radical o Índice de Tallo-Raíz (**ITR**). Este Índice expresa el equilibrio de la distribución de la masa y la robustez, evitando seleccionar plantas desproporcionadas y descartar plantas de menor altura, pero con mayor vigor (Dickson, Leaf, & Hosner, 1960; Fonseca, Valéri, Miglioranza, Fonseca, & Couto, 2002). De acuerdo con estudios realizados por (Hunt, 1990) en coníferas, un **ICD** inferior a 0,15 podría significar problemas en el establecimiento de una plantación; García (2007), recomienda para latifoliadas un valor de **ICD** de 0,2 como mínimo, para contenedores de hasta 60 ml, basado en resultados de plantaciones.

**Tabla 1. Descripción de las especies seleccionadas para el experimento.**

Nombre Común	Nombre científico	Ecofisiología
Jicaro Sabanero	<i>Crescentia alata</i>	Árbol perennifolio de 6 a 8 m de altura. Forma parte de vegetación de pastizal y sabanera. Suelo: migajón arcilloso y migajón arenoso, coloración rojiza a café; poco profundo, con pH de 6 a 8. Se adapta a temperaturas de -0°C hasta 27°C con precipitaciones de 300 a 600mm con 6 a 9 meses seco. Productor de hoja, flores, frutos y semillas.
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	Especie secundaria /primaria. Especie pionera en terrenos que han sido sujetos a cultivos. Especie de rápido crecimiento. Las temperaturas de 30°C son favorables para el alargamiento de la raíz y del hipocótilo. En 15 años puede alcanzar 20m de altura y 50 cm de diámetro. Productora de hojas, flores, frutos, madera y semilla. Buena productora de abono verde (mantillo)
Caoba	<i>Swietenia humilis</i>	Árbol de 10 a 25 m de altura y hasta 1 m de diámetro. Adaptable a temperatura media de 27.5°C, con precipitación de 800 a 2000 mm. Altitud: de 50 a 1000 msnm. Suelo: crece mejor en suelos profundo más de 50 cm, ligeramente ácidos y bien drenados, lo cual determina su lento o rápido crecimiento, productor de hoja, fruto, semilla y madera.
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	Especie de fácil adaptación. Especie de rápido crecimiento se desarrolla una excelente forma en campo abierto. En zonas húmedas su crecimiento es notablemente rápido. Puede alcanzar de 20 a 30 m en menos de 15 años. Presenta una descomposición foliar lenta. Especie con potencial para reforestación productiva en zonas degradadas secas y áridas.
Roble	<i>Tabebuia rosea</i>	Especie secundaria. Crece en sitios planos. Se desarrolla bien en suelos conocidos como vertisol pélico y vertisol gleyco. Especie de rápido crecimiento en zonas abiertas. Se regenera fácilmente. Productor de hojas, frutos, madera y semillas. Especie con potencial para reforestación productiva en zona degradadas de selva
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Especie secundaria. Es común en áreas secas y húmedas. Propia de zonas bajas cálidas. Se desarrollan en temperaturas entre 20 y 30°C con periodos secos de 4 y 7 meses adaptables a condiciones secas. Suelos: de origen volcánico o sedimentario, pedregoso, arenoso café claro, rojo latérico, somero, vertí sol, desde textura liviana hasta

		<p>texturas pesadas. Especie de fácil adaptación, se adapta a sitios áridos y sitios húmedos. Especie de rápido crecimiento. Se planta en suelos por debajo de 800 m de altitud, con precipitaciones de 900 a 1500 mm, con estación seca marcada. La especie llega a crecer en altura de 2.4 a 2.9 m/año. Descomposición foliar lenta. Productor de hojas, flores, frutos, madera y semillas. Especie con potencial para reforestación productiva en zonas degradadas secas y áridas.</p>
--	--	---

## VI. HIPOTESIS O PREGUNTAS DIRECTRICES

**H<sup>1</sup>:** Plántulas cultivadas en biochar presentan excelentes atributos morfológicos y de calidad de plántulas, lo que aumentará su establecimiento en suelos degradados.

**H<sup>0</sup>:** Plántulas cultivadas en biochar no presentan respuestas en los atributos morfológicos y de calidad de plántulas, y no aumentará su establecimiento en suelos degradados.

## CAPÍTULO 3

### VII. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 7.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se desarrolló en el invernadero de la Estación Experimental “El Limón” de la Facultad Regional Multidisciplinaria de Estelí. Está se encuentra ubicada a 1.5Km al suroeste de la ciudad de Estelí entre las coordenadas 13 03 44 N y – 86 21 57 OE a una altura de 888 msnm. La región se caracteriza por su clima seco, con una temperatura que varía entre 16 a los 33°C, con una precipitación aproximada de 830 mm, de los cuales el 90% caen durante 6 meses de la estación húmeda comprendidos entre mayo y noviembre (Peguero, Lanuza, Savé, & Espelta, 2012).

#### 7.2. Tipo de estudio

Según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010) esta investigación tiene un enfoque filosófico de tipo cuantitativo, porque el fenómeno objeto de estudio se cuantificó a través de conteos y mediciones de las variables en cada nivel del factor. Se usó el método experimental, el cual consiste en el control o manipulación de los factores y sus niveles de estudio. A demás, se considera analítico porque se determinaron las curvas dosis-respuestas a través de pruebas de hipótesis estadísticas.

Según su nivel de profundidad es de tipo exploratorio y explicativo, porque explica el efecto de los factores y sus niveles de estudio en las variables evaluadas. Según el tiempo

en que se realizó la investigación es de corte transversal, porque las variables objetos de estudio se midieron en un solo período y no en series de tiempo (estudio longitudinal) (Hernández Sampieri et al., 2010).

El estudio se ubica en la línea de investigación de “Agroforestería y Sistemas Silvopastoriles”, en el tema de Recuperación y Restauración de suelos degradados de la Estación Experimental “El Limón” para el estudio del trópico seco, adscrita a la UNAN - Managua/ FAREM - Estelí.

### **7.3. Diseño experimental**

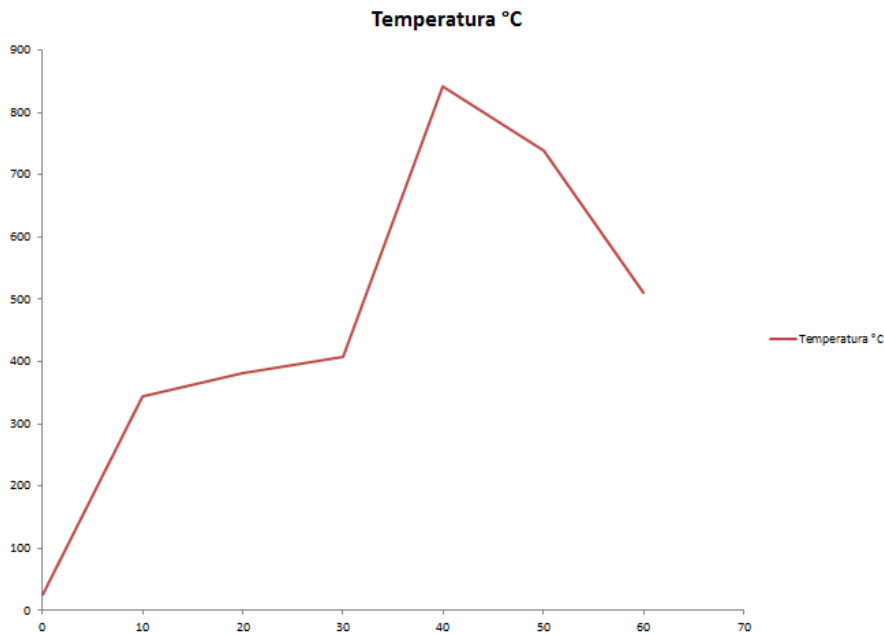
#### **7.3.1. Selección de especies, colección de semillas y germinación**

Las especies utilizadas en la investigación se seleccionaron tomando la disponibilidad de la semilla, su alta capacidad de sobrevivencia en campo, rápido crecimiento inicial, su alto potencial para la restauración de ecosistemas degradados (ver estudio de Wender et al 2017) y principalmente que son especies forestales nativas de nuestro país. Las especies seleccionadas fueron: *Cedrela odorata* L (Meliaceae), *Swietenia humilis* Zucc (Meliaceae), *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Bignoniaceae), *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (Boraginaceae), *Guazuma ulmifolia* Lam (Malvaceae), *Crescentia alata* (Bignoniaceae).

Las semillas fueron colectadas de los sectores aledaños a la Estación Experimental El Limón a finales de la época seca del 2019. La siembra de la semilla se realizó de manera directa en bandejas de 98 alveolos llenas con una mezcla de suelo y cascarilla de arroz (proporción 3:1 aproximadamente), es decir no se realizó ningún tratamiento pre germinativo. Se aplicó riego dos veces por semana hasta lograr la máxima germinación a los 20 días y las plántulas recién germinadas estuvieron un periodo total de 35 días hasta el trasplante a las bolsas.

#### **7.3.2. Obtención del biochar**

El biochar fue obtenido por pirolisis en un reactor TLUD (top-lit updraft gasifier), utilizando como principal sustrato madera seca de *Acacia pennatula* (90%) menor a 5 cm de diámetro. La temperatura de pirolisis alcanzada por el reactor se registró con un medidor de temperatura laser, con una capacidad de 1000°C y una precisión de  $\pm 3.5\%$ ; cada 10 minutos. El biochar se dejó enfriar hasta temperatura ambiente y luego fue triturado con un molino manual y cribado con tamiz de 2mm de apertura de malla.



**Figura 2. Temperatura interna del reactor alcanzada durante el proceso de pirolisis. Fuente elaboración propia.**

La grafica refleja el comportamiento de la temperatura a través del tiempo. En un inicio se observa una temperatura baja, puesto que primeramente se tomó el dato de temperatura ambiente de la biomasa, siendo 27.1 °C. Una vez empezado el proceso de combustión la temperatura se mostró de manera ascendente, en un lapso de 1h y 07 minutos, reflejando una temperatura media de 464.24°C. Alcanzando el punto máximo en el minuto 40, donde la temperatura fue de 841.7°C.

### **7.3.3. Preparación del suelo**

El suelo para el llenado de las bolsas es del orden vertisol y fue extraído de los primeros ~15 cm en los alrededores de la Estación Experimental El Limón. Se utilizaron bolsas de polietileno de 9 x 19 cm (664.4 cm<sup>2</sup>) llenas de una mezcla de suelo cribado en malla de 0.5 cm de apertura de agujero y biochar.

### **7.3.4. Determinación de la capacidad de campo**

La capacidad de campo se determinó en 10 bolsas llenadas con el mismo sustrato en el cual serán sembradas las plántulas. Para esto, cada bolsa se saturó con agua y se dejó escurrir el excedente de agua por 24 horas, y se tomó el peso fresco. Posteriormente cada bolsa se colocó en un horno a 105°C durante 24 horas y se anotó el peso seco. La diferencia entre el peso fresco y seco se consideró como capacidad de campo, para este caso la capacidad de campo estimada fue de 350ml.

### 7.3.5. Aplicación de los tratamientos

Los esfuerzos de restauración en TDF enfrentan muchas barreras, particularmente a nivel de establecimiento debido a las duras condiciones iniciales propias del bosque seco tropical que deben superar las nuevas plántulas. Teniendo en cuenta que el biochar como enmienda de suelo ha demostrado tener un gran potencial en la práctica de restauración (Gale et al., 2015), propusimos un diseño factorial cruzando dos tratamientos, especies con seis niveles y biochar con cuatro niveles de biochar y un testigo (suelo sin biochar). Es decir, una planta por bolsa con 20 repeticiones de cada tratamiento será usada (20 repeticiones x 6 especies x 5 dosis, n = 600) en un Diseño Completamente Aleatorizado.

Las dosis de biochar correspondientes a cada tratamiento fueron: control (0 g), 0.25% (35.1g), 5% (70.3g), 10% (140.6g) y 20% (281.2g) de biochar sobre el volumen de suelo promedio de cada bolsa (1406g). Cada plántula fue regada con 350ml de agua de la llave cada semana a partir de la segunda semana después del trasplante hasta el final del experimento. El 06 de agosto de 2019 aproximadamente 30 días después del trasplante se aplicó una dosis única de 3g de NPK (12-30-10) por plántula. Las plántulas se mantuvieron en el invernadero de la Estación Experimental El Limón durante 100 días aproximadamente.

**Tabla 2. Descripción de las variables medidas durante el experimento**

Variable	Descripción	Unidad
Altura parte aérea	Altura total del tallo	cm
Diámetro al cuello de la raíz	Diámetro a la base del tallo	mm
Peso seco de raíz	Peso seco de raíz en horno a 60°/48h	g
Peso seco de tallo	Peso seco del tallo en horno a 60°/48h	g
Peso seco de hoja	Peso seco de las hojas en horno a 60°/48h	g
Peso seco total	Suma del PSR+PST+PSH	g
La proporción de raíz	Biomasa de raíz/ biomasa total de la planta	g g <sup>-1</sup>
La proporción del tallo	Biomasa de tallo/ biomasa total de la planta	g g <sup>-1</sup>
La proporción de hoja	Biomasa de hojas/ biomasa total de la planta	g g <sup>-1</sup>
Contenido de materia seca	Relación de peso seco/ el peso fresco de la planta	g g <sup>-1</sup>
Largo específico de raíz	Largo de la raíz/ peso seco de la raíz	cm g <sup>-1</sup>
Índice de Calidad de Dickson	Masa planta / (Altura /Diámetro) + (Masa aérea / Masa radical)	
Índice de contenido de clorofila	Contenido de clorofila medido con Chlorophyll Content Meter Model CCM-200 Plus	
Índice de Lignificación	Peso seco total / peso húmedo total *100	

### 7.3.6. Colecta de datos

Al final del experimento luego de 100 días de haber aplicado los tratamientos, se midió la altura (cm), diámetro del cuello de raíz (DCR) con un vernier o pie de rey digital ( $\pm 0.01\text{mm}$ ), se contó el número de hojas y se midió el índice de contenido de clorofila de todas las plántulas con un Chlorophyll Content Meter Model CCM-200 Plus.

Cada plántula fue extraída de su bolsa sumergiéndola en un recipiente con agua para evitar pérdidas de raíz. Las plántulas fueron separadas por componente (raíz, tallo y hoja) y se secaron con papel absorbente para evitar medidas de peso erróneas. De cada planta se estimó el peso fresco de raíz, tallo, hoja y total (g), en una balanza analítica modelo ACCULAB VICON con una precisión de 0.001g y se midió el largo de cada raíz con una cinta métrica ( $\pm 1\text{mm}$ ).

Los componentes de cada plántula fueron puestos en bolsas individuales de papel y se colocaron en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Cada bolsa fue rotulada para evitar pérdidas o alteraciones de datos. Luego del secado, se estimó el peso seco de raíz, tallo, hoja y total (g), la fracción de masa de raíz, tallo y hoja ( $\text{g g}^{-1}$ ) y el largo específico de raíz ( $\text{m g}^{-1}$ ).

Para determinar la calidad de las plántulas en vivero, se utilizará el Índice de calidad de Dickson ICD (Dickson et al., 1960), este índice integra la relación entre la masa seca total de la planta, la suma de la esbeltez y la relación parte seca aérea/parte seca radicular, el cual se presenta la siguiente fórmula:

$$ICD = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\frac{\text{Altura tallo (cm)}}{\text{Diámetro tallo (mm)}} + \frac{\text{Peso seco tallo (g)}}{\text{Peso seco raíz (g)}}}$$

### 7.3.7. Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos y gráficos fueron ejecutados con InfoStat versión 2015 (JA Di Rienzo, Casanoves, Balzarini, Tablada, & Robledo, 2015) y R versión 3.2.1 (R Core Team, 2019). Los análisis se realizaron mediante Modelos Lineales Generales y Mixtos, con las especies y las dosis de biochar como efectos fijos. Se probaron diferentes estructuras de varianza residual para considerar la falta de homogeneidad de varianzas (JA. Di Rienzo, Macchiavelli, & Casanoves, 2011). El supuesto de normalidad fue evaluado usando QQ-plot y la prueba de Shapiro-Wilks. Los mejores modelos se seleccionaron de acuerdo con los criterios de información de Akaike (AIC) y Schwarz (BIC). En todos los análisis se reportan las medias  $\pm 1$  error estándar y las medias se compararon usando la prueba LSD Fisher ( $p < 0,05$ ).



**Tabla 3. Matriz de operacionalización de variables e indicadores**

Objetivo General	Objetivos Específicos	Variables	Indicadores
<p>Evaluar el efecto de cinco dosis de biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia en invernadero de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.</p>	<p>Determinar los efectos de biochar sobre las características morfológicas de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.</p>	<p>Características morfológicas de las plantas forestales</p>	<p>Área de la hoja(mm)                      Altura del tallo (cm)                      Diámetro a la base del tallo (mm)                      Peso seco de raíz en horno a 60°/48h(g)                      Peso seco del tallo en horno a 60°/48h(g)                      Peso seco de las hojas en horno a 60°/48h(g)</p>
	<p>Construir curvas dosis-respuestas de las principales variables morfológicas de plántulas de las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.</p>	<p>Principales variables morfológicas de plántulas</p>	<p>Altura del tallo (cm)                      Diámetro a la base del tallo (mm)</p>
	<p>Determinar el efecto del biochar sobre el Índice de Dickson (IQ) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.</p>	<p>Estado de forma</p>	<p>Peso seco de la planta, altura diámetro, masa aérea, masa radical</p>

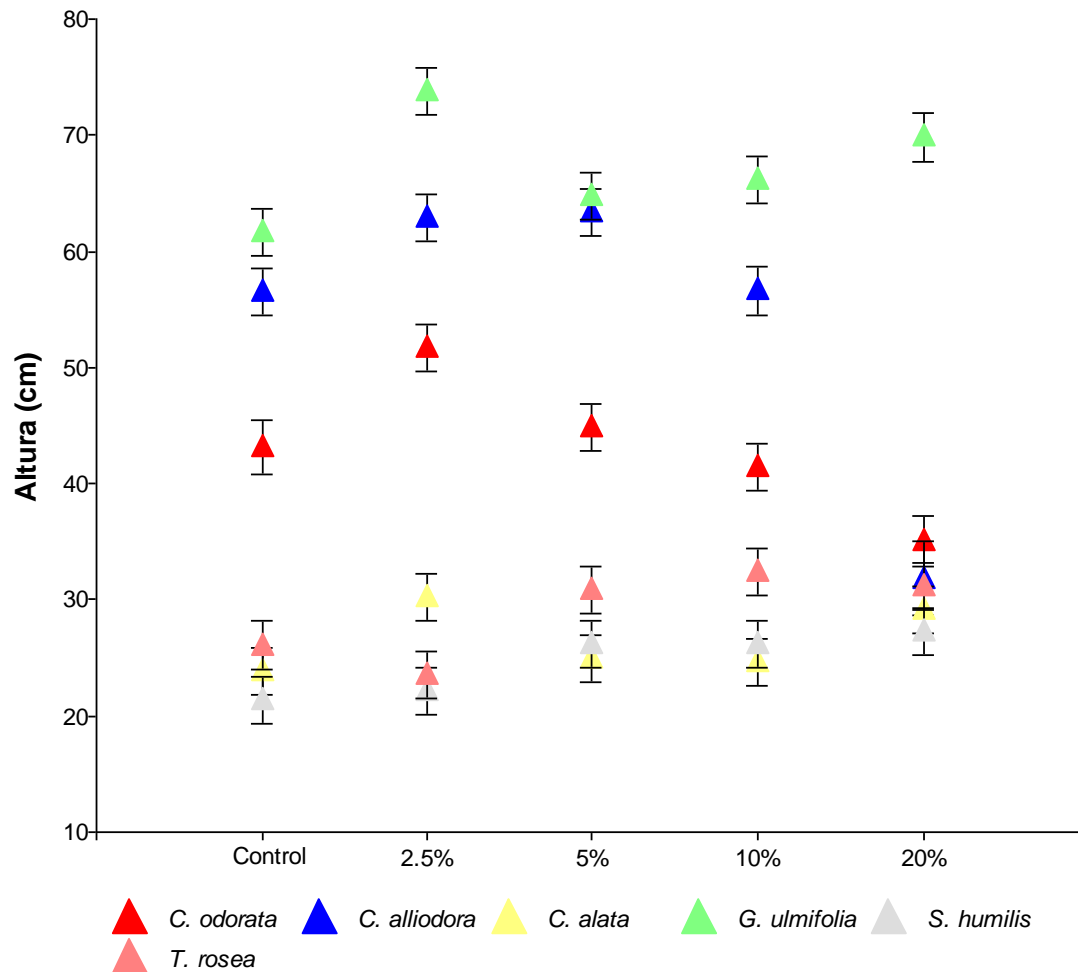
## CAPÍTULO IV

### VIII. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 8.1. Comprobar los efectos de biochar sobre las características morfológicas de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.

Las especies difieren significativamente respecto a la altura ( $F = 6.99$ ;  $p < 0.0001$ ). En todos los tratamientos la especie con mayor altura fue *G. ulmifolia*, destacando que en el tratamiento 2.5% alcanzó su punto máximo, seguido *C. alliodora* no muestra diferencias entre los tratamientos salvo del 20%. *C. odorata* refleja una tendencia descendente en cuanto a altura, omitiendo el 2.5%. Por otra parte, *T. rosea*, *C. alata* y *S. humilis* fueron las especies que obtuvieron menor altura respecto a las demás especies.

Según Rueda-Sánchez et al. (2014) una planta es de buena calidad cuando tiene una altura superior a 15 cm. En este estudio, todas las especies en todos los tratamientos tuvieron una buena calidad porque la altura promedio fue de 40 cm (mínimo 8.4 cm y máximo 87.5 cm). La variable altura se relaciona con su capacidad fotosintética y su superficie de transpiración. Las plantas más altas pueden lidiar mejor con su vegetación competidora, aunque esto implica una buena salud fisiológica y un sistema radicular adecuado (Arnold, 1996). La altura está asociada con la forma de crecimiento, la posición de la especie en el gradiente vertical de exposición a la luz, el vigor competitivo, el tamaño reproductivo, la fecundidad de la planta, la longevidad promedio y si la especie es capaz de establecerse y alcanzar un tamaño reproductivo entre dos eventos de disturbio (fuego, tormenta, arado, pastoreo, etc) (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).



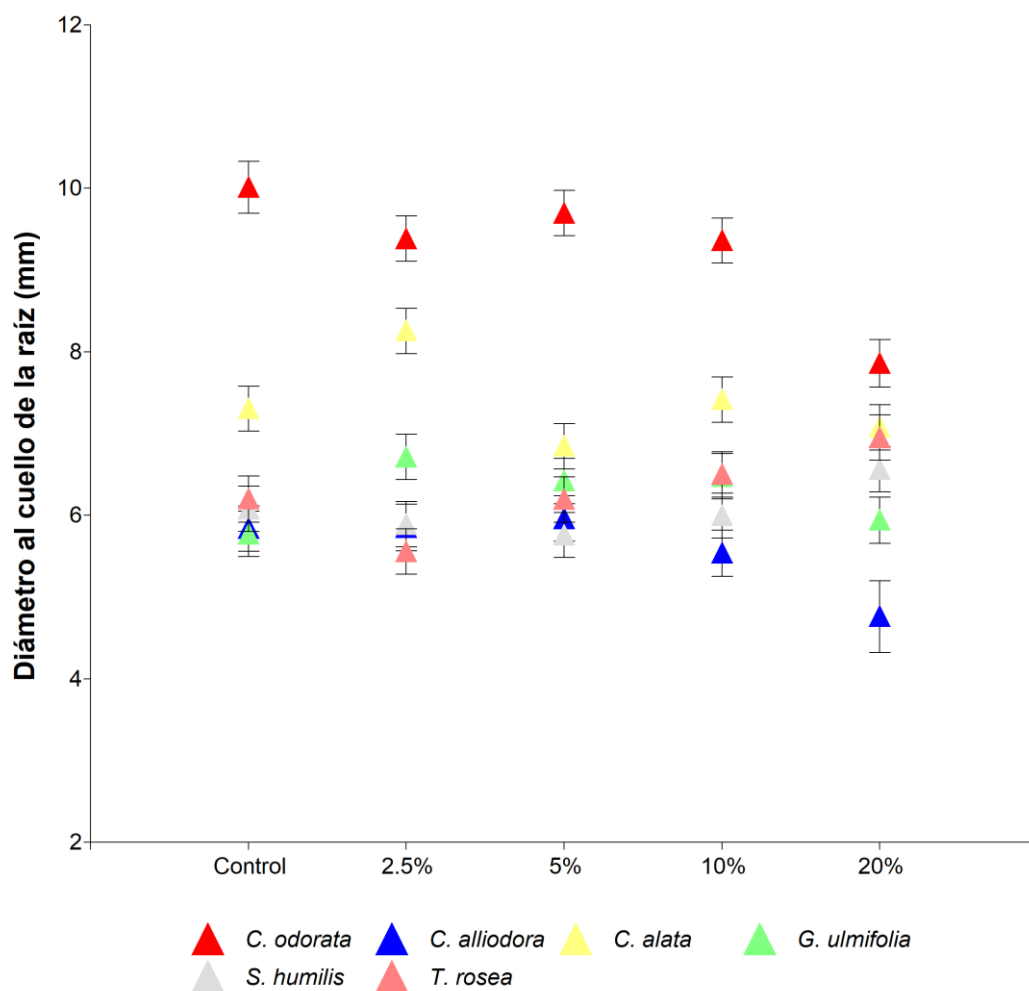
**Figura 3. Efectos de biochar sobre la altura de las plántulas**

Se encontró un efecto del biochar sobre el diámetro al cuello de raíz diferente entre las especies ( $F = 3.75$ ;  $p < 0.0001$ ), en la gráfica 2 se observa que la especie con mayor diámetro al cuello de la raíz es *C. odorata* seguido de *C. alata* mostrando una tendencia similar entre tratamientos. *G. ulmifolia* no presenta diferencias significativas entre las diferentes dosis de biochar para el diámetro al cuello de la raíz, sin embargo, se percibe que en *S. humilis*, *T. rosea* y *C. alliodora* son las que muestran menor diámetro al cuello de la raíz.

El diámetro es probablemente el mejor y más fácil predictor global de crecimiento posterior y supervivencia de las plántulas en campo (Thompson, 1984). El diámetro al cuello de la raíz es un indicador de la capacidad de transporte de agua hacia la parte aérea, de la resistencia mecánica y de la capacidad relativa de tolerar altas temperaturas de las plantas. Arnold (1996) establece como indicadores de calidad de una planta la altura, el diámetro de cuello y el peso fresco de la planta, señalando que mientras mayor es el diámetro y el peso fresco de una planta, mejor será la calidad de ella. Es decir, plántulas con diámetros grandes

resisten mejor a la flexión, toleran más daños a insectos y animales, y están mejor aisladas del calor que aquellas con diámetros más pequeños (Johnson & Cline, 1991).

El diámetro al cuello de la raíz es una de las características de calidad más importante que permite predecir la supervivencia de la planta en campo; ya que define robustez y se asocia con el vigor de la plantación y éxito de la plantación (Sáenz, Villaseñor, Muñoz, Rueda, & Prieto, 2010). El diámetro es un indicador del comportamiento de la altura y ambos definen la producción de biomasa en la parte aérea y la raíz (Mexal & Landis, 1990).

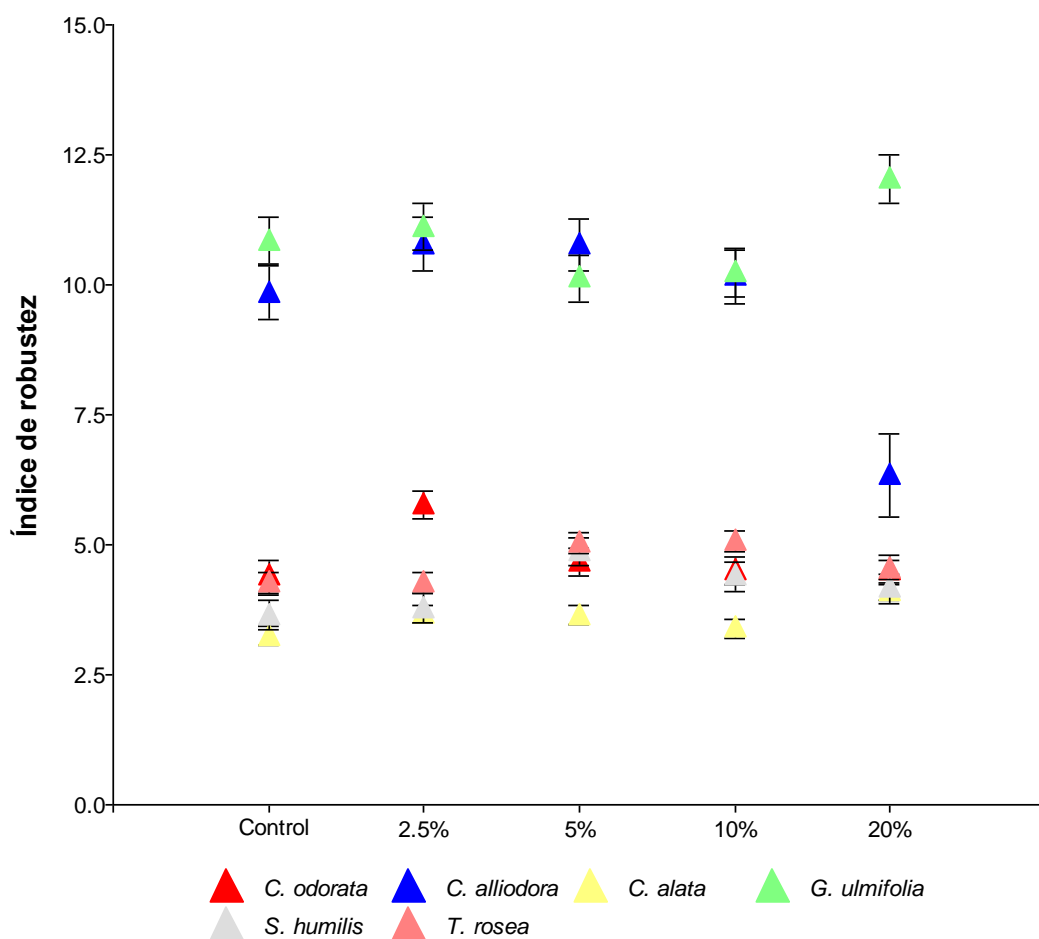


**Figura 4. Efectos del biochar sobre el diámetro al cuello de la raíz**

Se encontró un efecto diferenciado de los tratamientos para el índice de robustez (**IR**) entre especies ( $F=4.01$ ;  $p<0.0001$ ) figura 5. En todas las dosis de Biochar, *G. ulmifolia* y *C. alliodora* presentaron el mayor índice de robustez, sin embargo, *C. alliodora* presentó una disminución drástica del **IR** en el tratamiento de 20%, mientras *G. ulmifolia* mostró un incremento en este mismo tratamiento. Por otra *S. humilis*, *T. rosea* y *C. alata* no presentan diferencias entre tratamiento.

Los estándares de calidad basados en una combinación de altura y diámetro de brotes de plántulas parecen ofrecer una buena guía práctica para la calidad morfológica de las plántulas (Johnson & Cline, 1991). Este índice relaciona la resistencia de la planta con la capacidad fotosintética de la misma (Toral, 1997).

Según Rueda-Sánchez et al. (2014), Valores superiores o iguales a 8 corresponden a plántulas de mala calidad porque la planta es muy alta respecto al diámetro, valores entre 7.9 - 6 indican plántulas de mediana calidad, mientras que plántulas con un **IR** menor a 6 indican plántulas de buena calidad por que muestran un mejor balance entre la altura y el diámetro al cuello de la raíz y por lo tanto tienen mayor resistencia en campo.

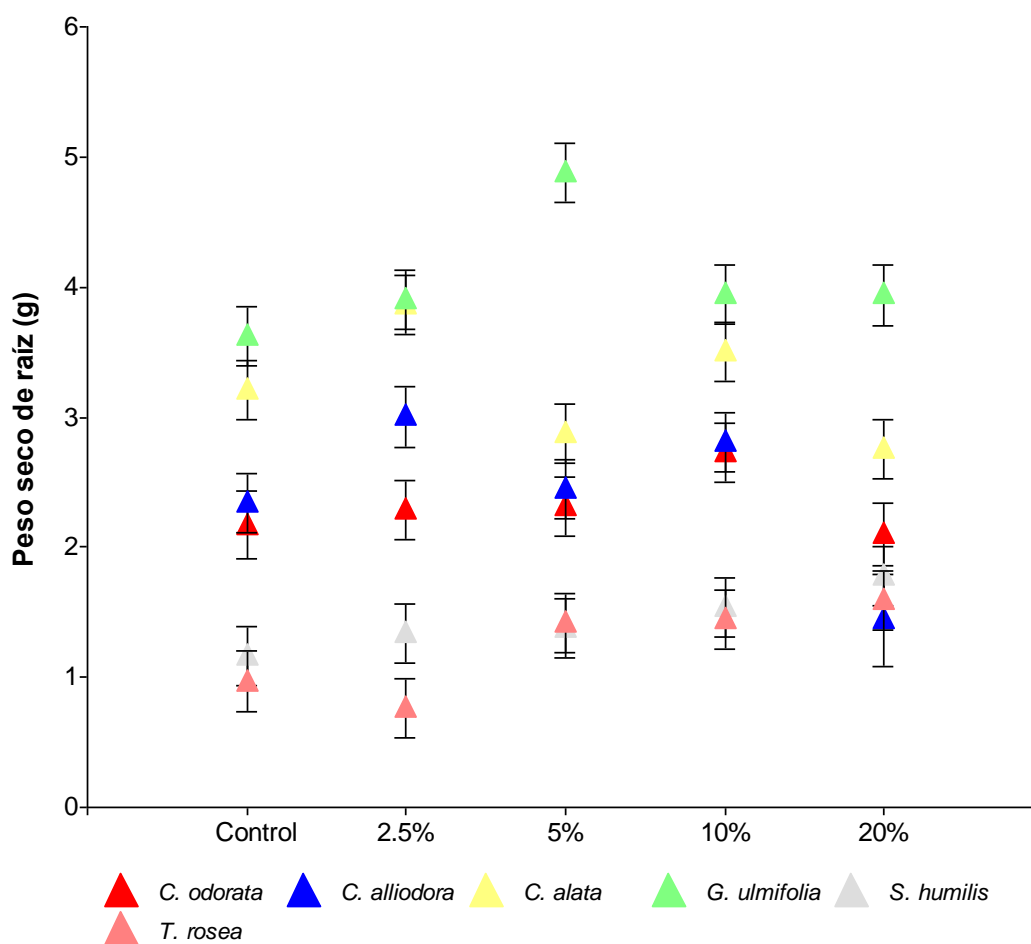


**Figura 5. Efectos del biochar sobre el índice de robustez o esbeltez de las plántulas**

En el peso seco de raíz se encontraron diferencias entre especie y tratamiento ( $F = 2.82$ ;  $p < 0.0001$ ) figura 6. Las especies con mayor incidencia del peso seco de raíz en todos los tratamientos es *G. ulmifolia* y *C. alata*. Sin embargo, *C. alliodora* y *C. odorata* muestran una tendencia similar, que no difiere entre especie sobre el peso seco de raíz en cada uno de los tratamientos, la especie con menos peso de raíz es *T. rosea* excepto en el tratamiento

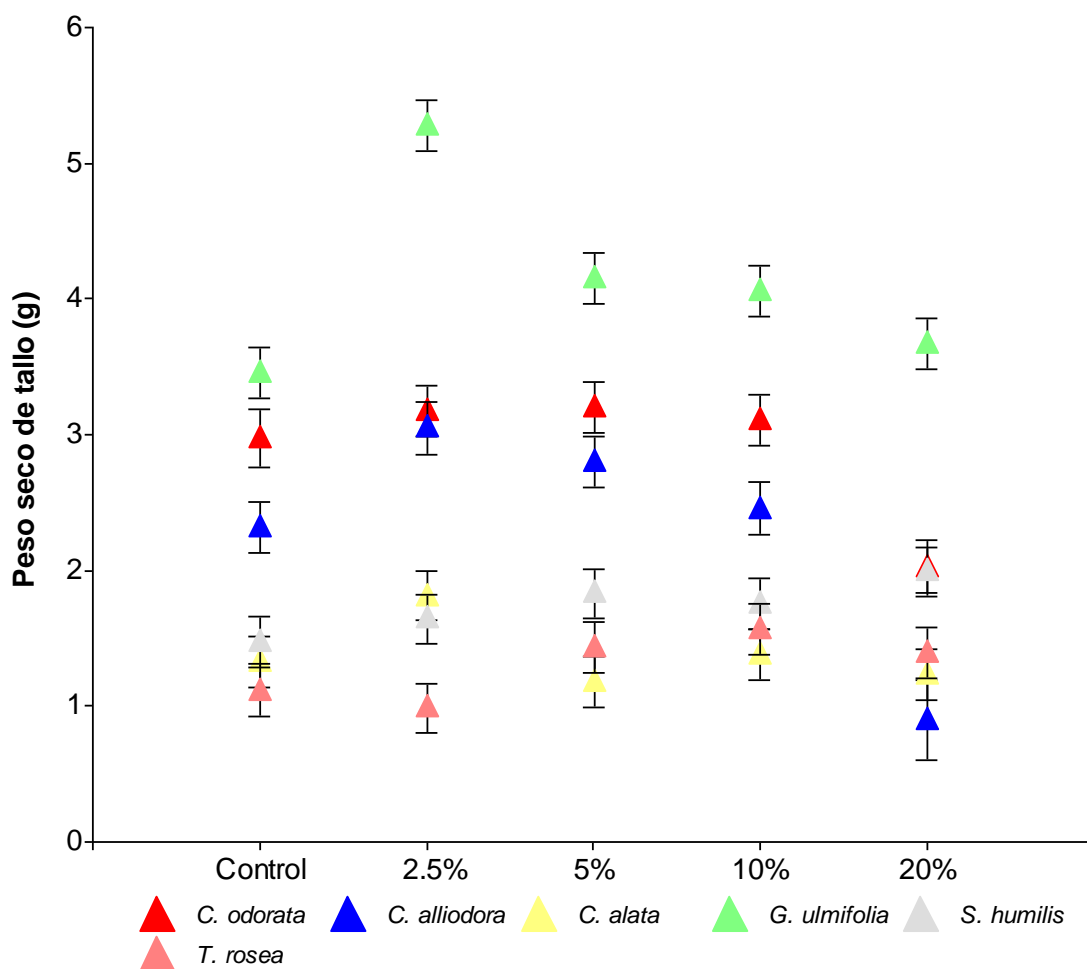
20%. Desde el punto de vista ecológico, es ideal que las plántulas presenten un buen sistema radicular, porque esto les permite explorar zonas más profundas del suelo y adquirir los nutrientes y el agua necesarios para su crecimiento. Una planta que presenta un sistema radicular limitado es poco robusta y por lo tanto tendrá baja resistencia al doblamiento y a los daños ocasionados por herbívora y parasitismo (Toral, 1997).

Entre mayor sea el sistema radical de la planta, tendrá mayor oportunidad de crecimiento y mayor posibilidad de explorar el suelo para captar agua y nutrientes (González, 1995). El desarrollo del sistema radical depende del agua que dispone el sustrato, lo que determina su crecimiento y desarrollo, porque si la planta tiene abundante agua no invertirá en producción de raíces, de lo contrario, si se encuentra en condiciones de sequía es necesario que la planta cuente con un sistema radicular amplio para que pueda sobrevivir. La inducción de un estrés hídrico moderado al final de un periodo vegetativo, detiene el crecimiento en altura, mientras que el diámetro al cuello de la raíz continúa creciendo debido al crecimiento radical (Leiva, Rocha, Mata, & Gutiérrez-Soto, 2009).



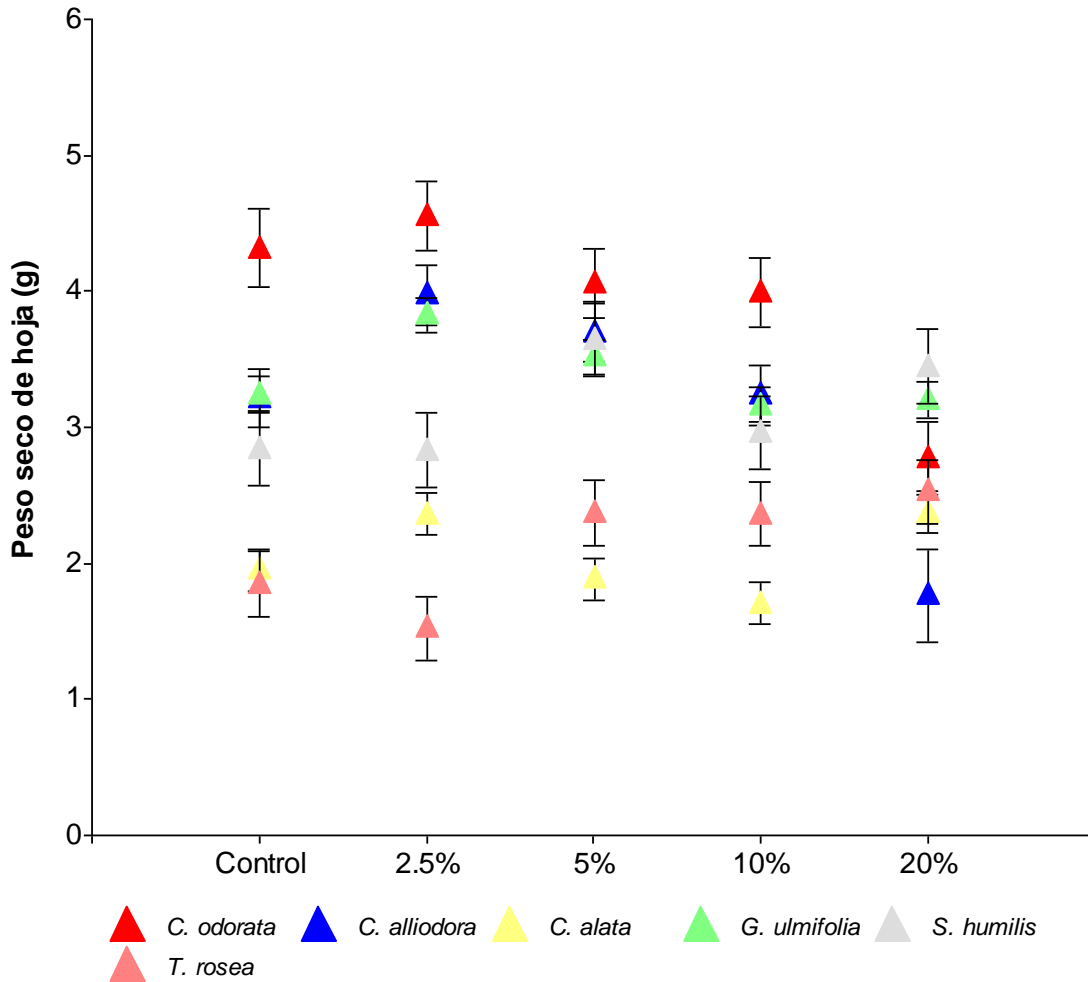
**Figura 6. Efectos del biochar sobre el peso seco de la raíz de las plántulas**

El peso seco del tallo difirió entre especies y dosis de biochar ( $F = 4.91$ ;  $p < 0.0001$ ; interacción especie-tratamiento) figura 7. En todas las dosis de biochar, la especie con el mayor peso seco del tallo fue *G. ulmifolia*, seguido de *C. odorata*, *C. alliodora*, cabe aclarar que, *C. alliodora* tuvo una disminución drástica del peso seco del tallo en el tratamiento 20% respecto a las dosis más bajas de biochar. En todos los casos *T. rosea* y *S. humilis* fueron las especies con el menor peso seco del tallo en todos los tratamientos de biochar.



**Figura 7. Efectos del biochar sobre el peso seco del tallo de las plántulas**

Se encontraron diferencias significativas entre especies para el peso seco de hojas ( $F = 4.49$ ;  $p < 0.0001$ ). *C. alliodora*, *G. ulmifolia* y *C. odorata* muestran una descendencia en todos los tratamientos conforme aumenta las dosis de biochar, excepto en el 2.5%. *C. alata*, *S. humilis*, *T. rosea* fueron las especies que invirtieron mayor cantidad en peso seco de hojas en el tratamiento 20%.

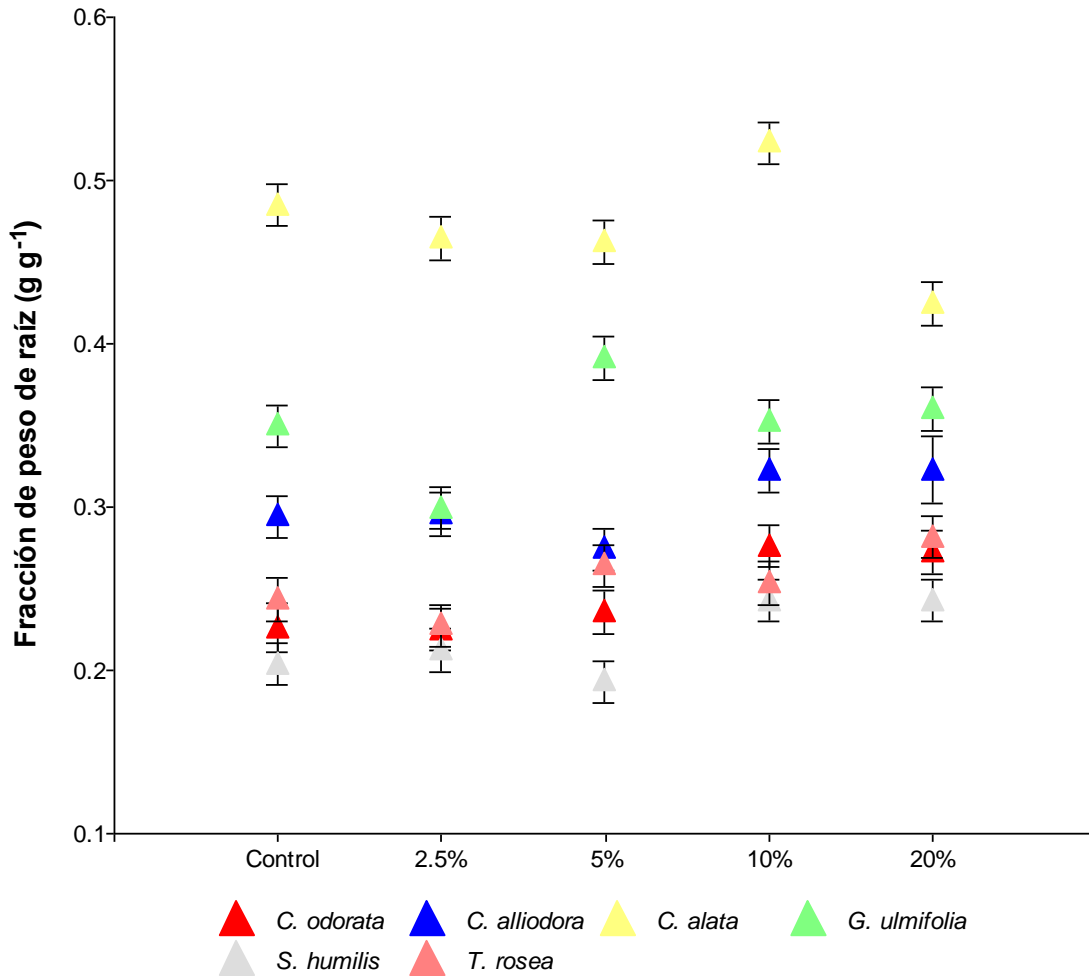


**Figura 8. Efectos del biochar sobre el peso seco de la hoja de las plántulas**

Se encontró un efecto de las dosis de biochar sobre la fracción de peso de la raíz, que se diferencia entre especies ( $F = 3.36$ ;  $P < 0.0001$ ) figura 9. En todas la dosis de biochar *C. alata* fue la especie con la mayor fracción del peso de la raíz respecto al total; de igual forma se observa en esta especie un decrecimiento de la raíz respecto al total, conforme aumenta la dosis de biochar, excepto en el 10% donde presenta incremento significativo. Por otra parte, se refleja en el otro extremo de la gráfica que *C. odorata* y *T. rosea* fueron similares en su fracción de peso de raíz, sin embargo, ambas especies muestra una tendencia creciente conforme se aumenta la dosis de biochar.

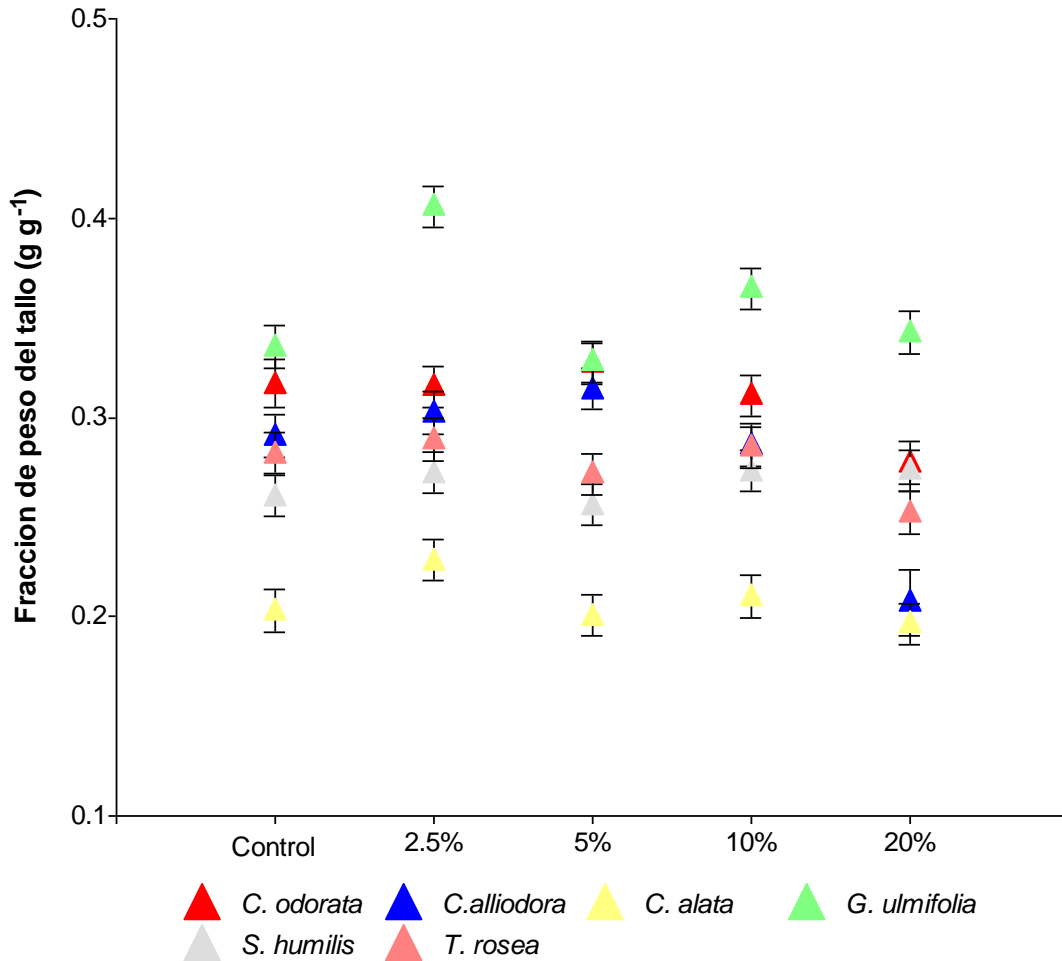
La teoría sugiere que las plantas de sitios pobres en nutrientes podrían asignar una fracción mayor de la biomasa nueva a las raíces y mantener una distribución proporcionalmente más alta de biomasa en raíces que en tallos (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Los resultados sugieren que *C. alata* asigna entre el 40 - 50% de la biomasa a la raíz, mientras que las demás especies invierte cerca del 30% de la biomasa en la raíz.





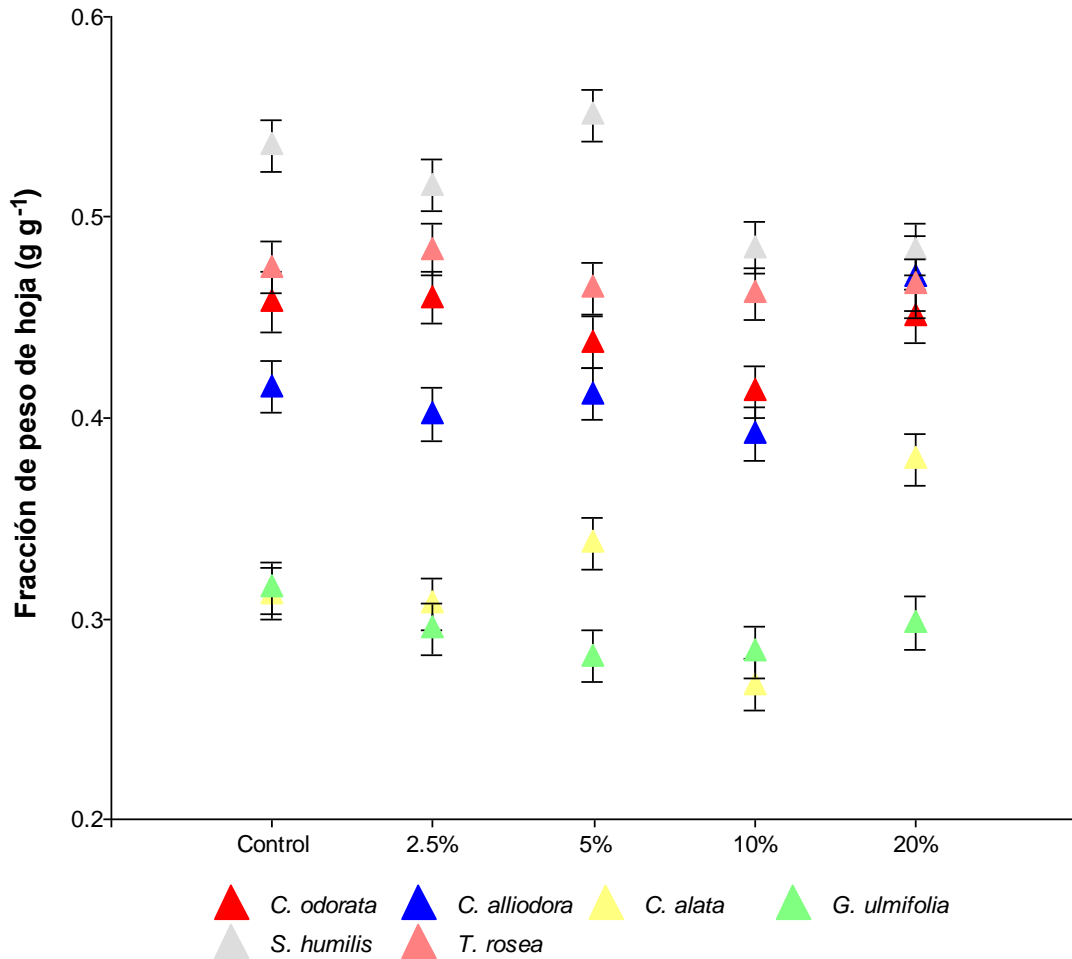
**Figura 9. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco de raíz de las plántulas**

Se encontró un efecto de las dosis de biochar sobre la fracción de peso del tallo para cada una de las especies ( $F = 2.95$ ;  $p < 0.0001$ ), figura 10. En todos los casos, *G. ulmifolia* fue la especie con la mayor fracción del peso seco del tallo respecto al total, mientras que *C. alata* que invirtió menor biomasa del tallo respecto a la biomasa total. Por otra parte, se observa que las demás especies tienen una leve tendencia decreciente de la fracción del peso seco del tallo conforme aumenta las dosis de biochar. Cabe aclarar que, *C. alliodora* mostró una disminución drástica de la fracción del peso seco del tallo en el tratamiento 20%.



**Figura 10. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco del tallo de las plántulas**

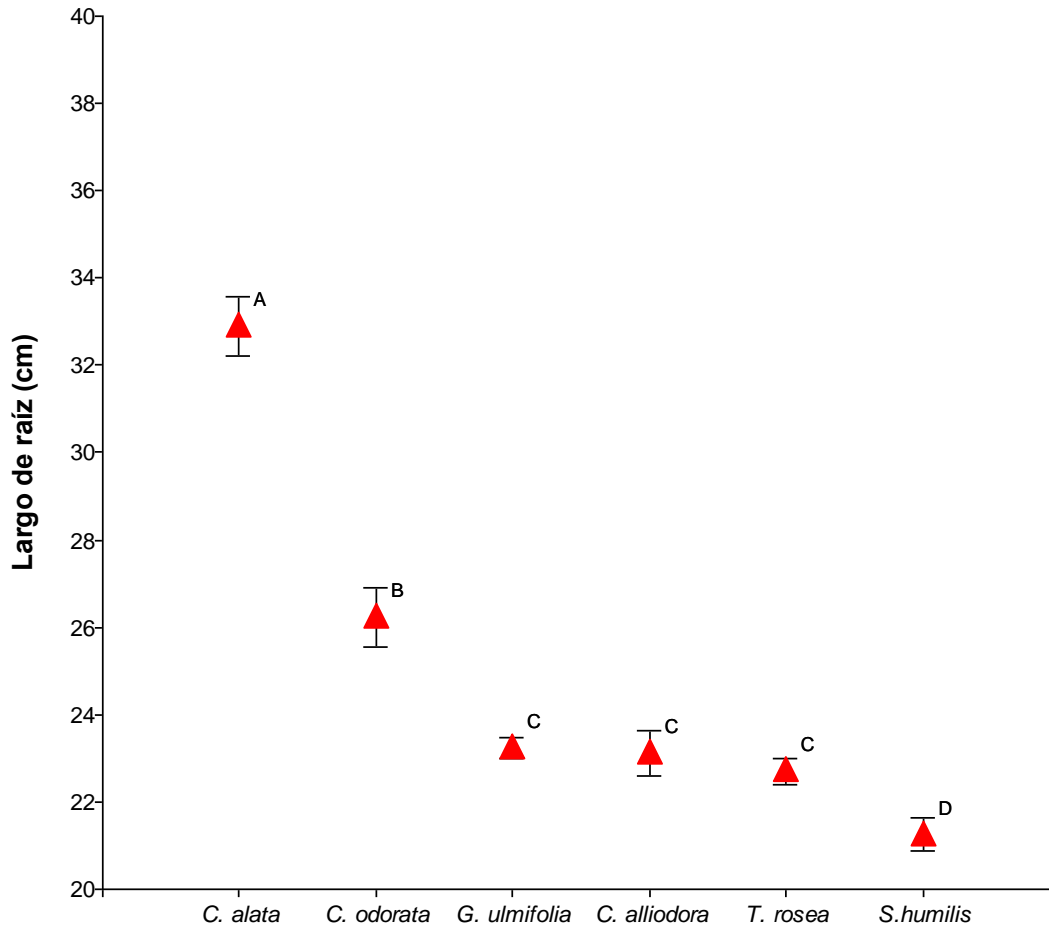
La fracción del peso seco de las hojas respecto al total difirió entre tratamientos y especies ( $F = 2.95$ ;  $P < 0.0001$ ; figura 11). En la figura se refleja que *S. humilis* fue la especie que invirtió mayor cantidad de biomasa foliar respecto al total, excepto en el tratamiento 10% y 20% que no difirió de *T. rosea* y *C. alliodora* respectivamente. *C. alliodora* produjo similar fracción de peso de hojas en todos los tratamientos, excepto en el 20% donde se observa un incremento significativo. *C. odorata* y *T. rosea* produjeron similar fracción de peso seco de hojas en todas las dosis de biochar excepto en el 10% donde *C. odorata* muestra una disminución de la fracción del peso seco de la hoja respecto al total. *G. ulmifolia* y *C. alata* fueron las especies con menor fracción de peso seco de hojas respecto al total, de igual forma, se observa que *C. alata* en el tratamiento 5% y 20% difirió significativamente de *G. ulmifolia*.



**Figura 11. Efectos del biochar sobre la fracción de peso seco de la hoja de las plántulas**

No se encontraron diferencias significativas entre tratamiento y especie para largo de raíz ( $F = 1.28$ ;  $p = 0.1876$ ), sin embargo, si se encontraron diferencias significativas entre especies ( $F = 50.25$ ;  $p < 0.0001$ ) figura 12, siendo *C. alata* la especie con mayor largo de raíz, seguido de *C. odorata*. Las especies que no difirieron entre si respecto al largo de raíz fueron: *G. ulmifolia*, *C. alliodora* y *T. rosea*. Por otra parte, la especie con menor largo de raíz fue o *S. humilis*.

El crecimiento y desarrollo de la raíz es una de las características importantes para el éxito en el establecimiento y supervivencia de las plantas, pues de esta depende en gran medida la absorción de agua y nutrientes esenciales para los diferentes procesos fisiológicos. El sistema radical, en respuesta a condiciones de sequía, son de gran importancia para la adaptación de la planta al ambiente (García-Figueroa & Vargas-Hernández, 1999). Las plantas que desarrollan un buen largo de raíz, bajo condiciones de estrés hídrico presentan un mayor crecimiento de las plantas.



**Figura 12. Efectos del biochar sobre el largo de la raíz de las plántulas**

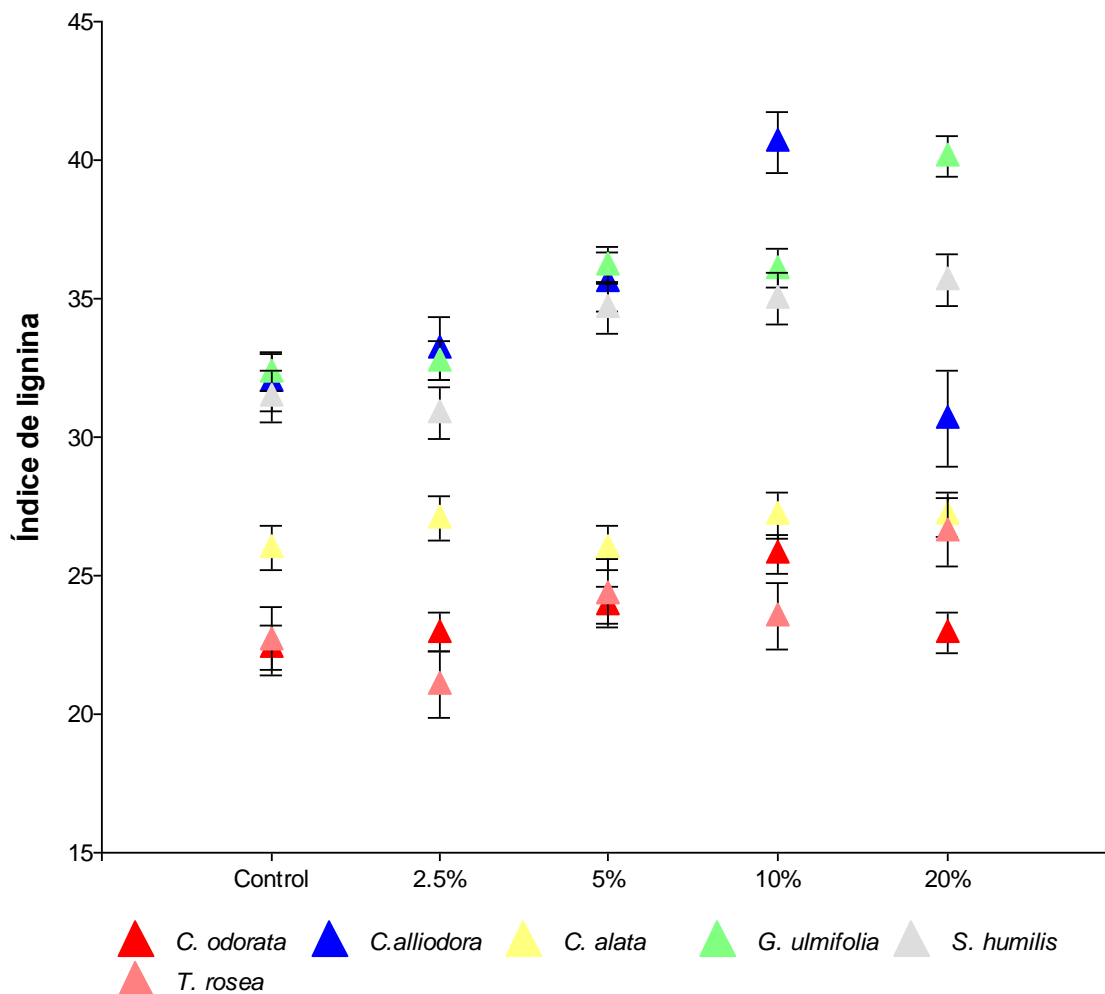
**8.2. Determinar el efecto del biochar sobre el índice de Lignina (IL) e Índice de Clorofila (ICC) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.**

Se encontró un efecto de las dosis de biochar diferente para cada una de las especies sobre el índice de lignina ( $F = 4.31$ ;  $P < 0.0001$ ). De manera general en la figura 11, se observa una tendencia creciente del **IL** conforme aumentan las dosis de biochar, excepto para *C. alliodora* y *C. odorata* que alcanzan su punto más alto en 10% de biochar y luego descenden. Por otra parte, las especies con menor **IL** fueron *C. alata*, *T. rosea* y *C. odorata*.

Según Rueda-Sánchez et al. (2014) el índice de lignina es uno de los atributos fisiológicos que indican la calidad de las plantas. Plantea que, una planta de alta calidad debe poseer un contenido de lignina, mayor al 11.3%. Por lo tanto, las plantas de las seis especies forestales sembradas con diferentes dosis de biochar utilizadas para la investigación son de alta calidad, contienen una característica de plantas fuertes y con gran capacidad de

sobrevivencia en campo, puesto que su contenido de lignina supera el 21.8% en todas las especies.

Los árboles que están suficientemente lignificados muestran tallo relativamente duros, que no se doblan con facilidad. Esta es una característica que les confiere mucha resistencia al momento de ser plantadas en campo, disminuyendo la mortalidad.

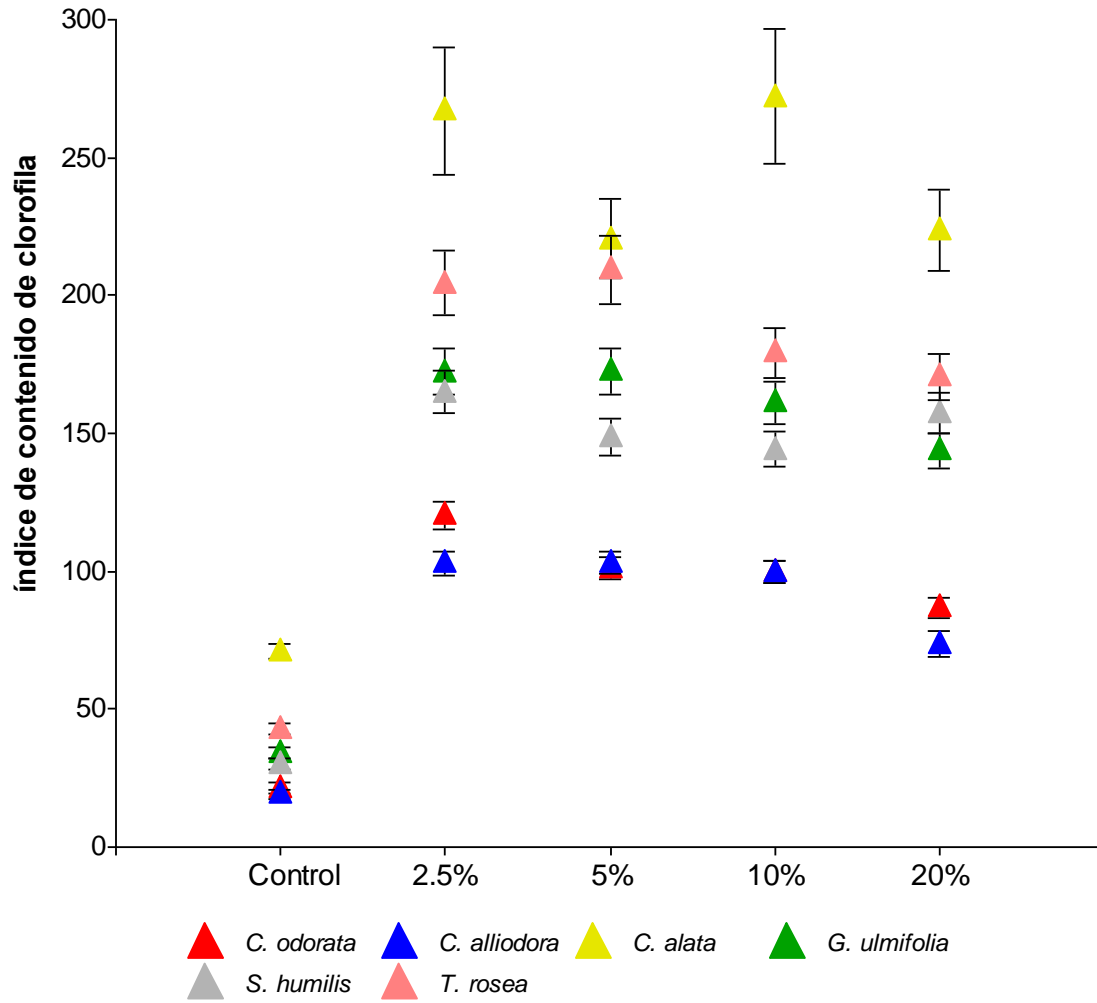


**Figura 13. Efectos del biochar sobre el índice de lignina de las plántulas**

En el índice de Clorofila de las hojas fue diferente entre las especies y las dosis de biochar ( $F = 17.70$ ;  $P < 0.0001$ ; interacción especie-tratamiento). En la figura 14, se observa que en el control todas las especies mostraron el menor índice de clorofila, mientras tanto, *C. alata* fue la especie con el mayor índice de clorofila en todos los tratamientos. La mayoría de las especies alcanzaron su punto más alto de índice de clorofila en la dosis de biochar de 2.5%, luego se observa una tendencia decreciente del **ICC** para todas las especies.

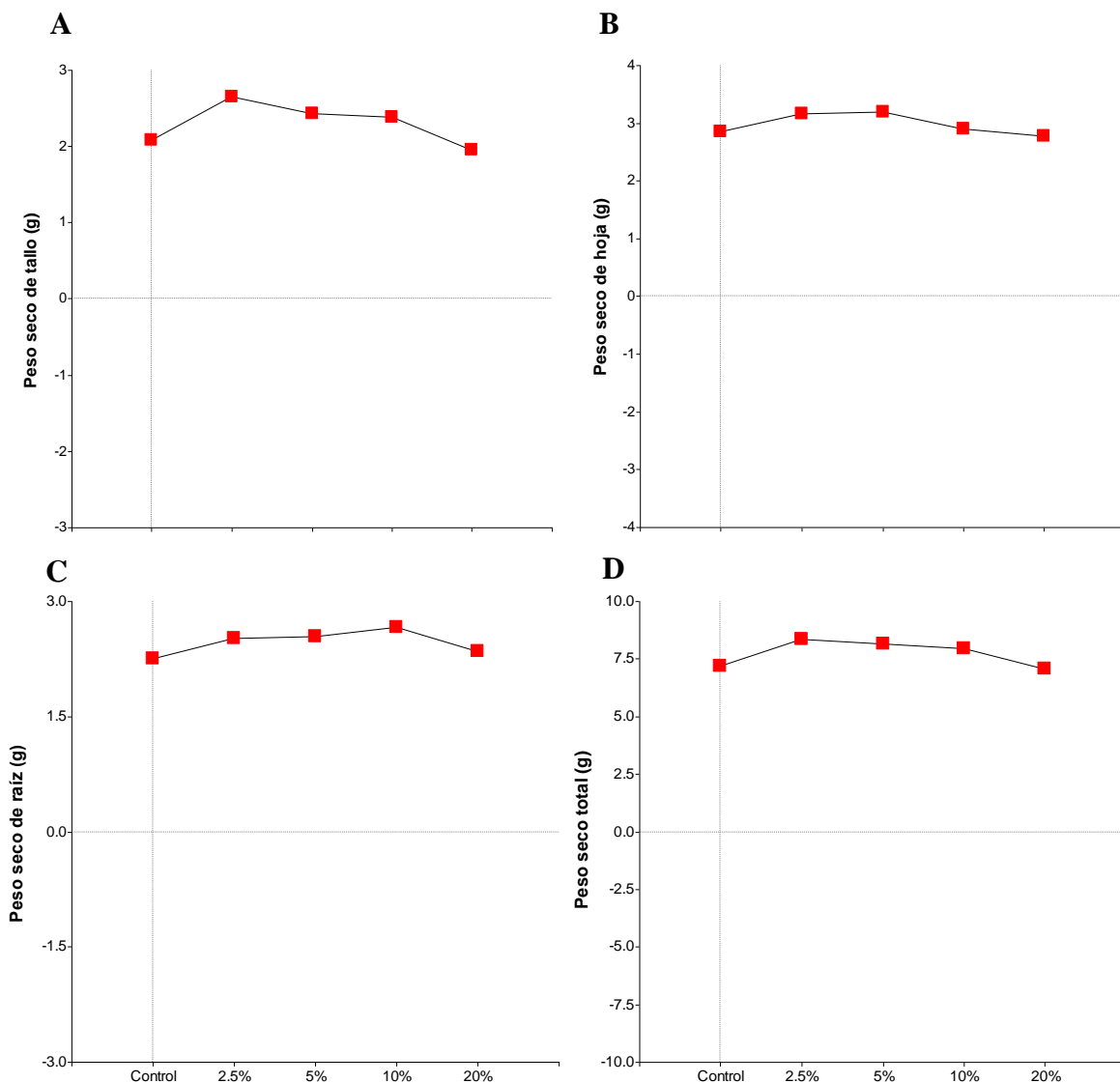
La concentración de clorofila es una de las principales características que determinan la productividad de una planta (Álvarez-Holguín et al., 2018). La masa seca foliar y del sistema radical son los componentes más afectados por el ambiente lumínico de crecimiento y, por lo tanto, las plantas se adaptan un modelo de distribución de fotoasimilados; el cual consiste en que las plantas que contienen altos índices de clorofila translocan la mayor proporción de biomasa a las raíces, en cambio las que poseen menor **ICC** invierten más en sus brotes (tallos y hojas). Esto coincide con los resultados obtenidos en nuestra investigación, puesto que *C. alata* es la planta con mayor índice de clorofila en todos los tratamientos, conteniendo menor cantidad de biomasa seca en el tallo y hojas; y la que mayor masa seca de raíz posee, por ende, tienen alta probabilidad de sobrevivencia puesto que tienen la posibilidad de expandir sus raíces para la obtención de agua y minerales que necesiten.

Estos resultados coinciden con los reportados por (Fonseca et al., 2002) quienes encontraron una mayor relación altura/diámetro de tallo a medida que se disminuye el porcentaje **ICC** y señalaron que un índice de esbeltez más elevado implica plantas con menos resistencia a condiciones de campo impuesta por los factores del ambiente. Las plantas son más robustas y con menos probabilidad de daños físicos por acción del viento y sequías.



**Figura 14. Efecto del biochar sobre el índice de contenido de clorofila de las plántulas**

**8.3. Construir curvas dosis-respuestas de las principales variables morfológicas de plántulas de las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.**



**Figura 15. Curvas dosis respuestas de los principales rasgos morfológicos de las seis especies bajo diferentes dosis de biochar.**

De manera descriptiva, en la figura se observa que la mejor respuesta de las plantas para el peso seco en general se obtuvo para todas las especies en el tratamiento de biochar del 2.5%, a excepción del peso seco de la raíz, donde la mejor respuesta se presentó en el tratamiento 10%.

La biomasa de la planta tiene gran correlación con la supervivencia en campo y con la consistencia del diámetro del tallo (Meax y Landis, 1990). La relación de los resultados con



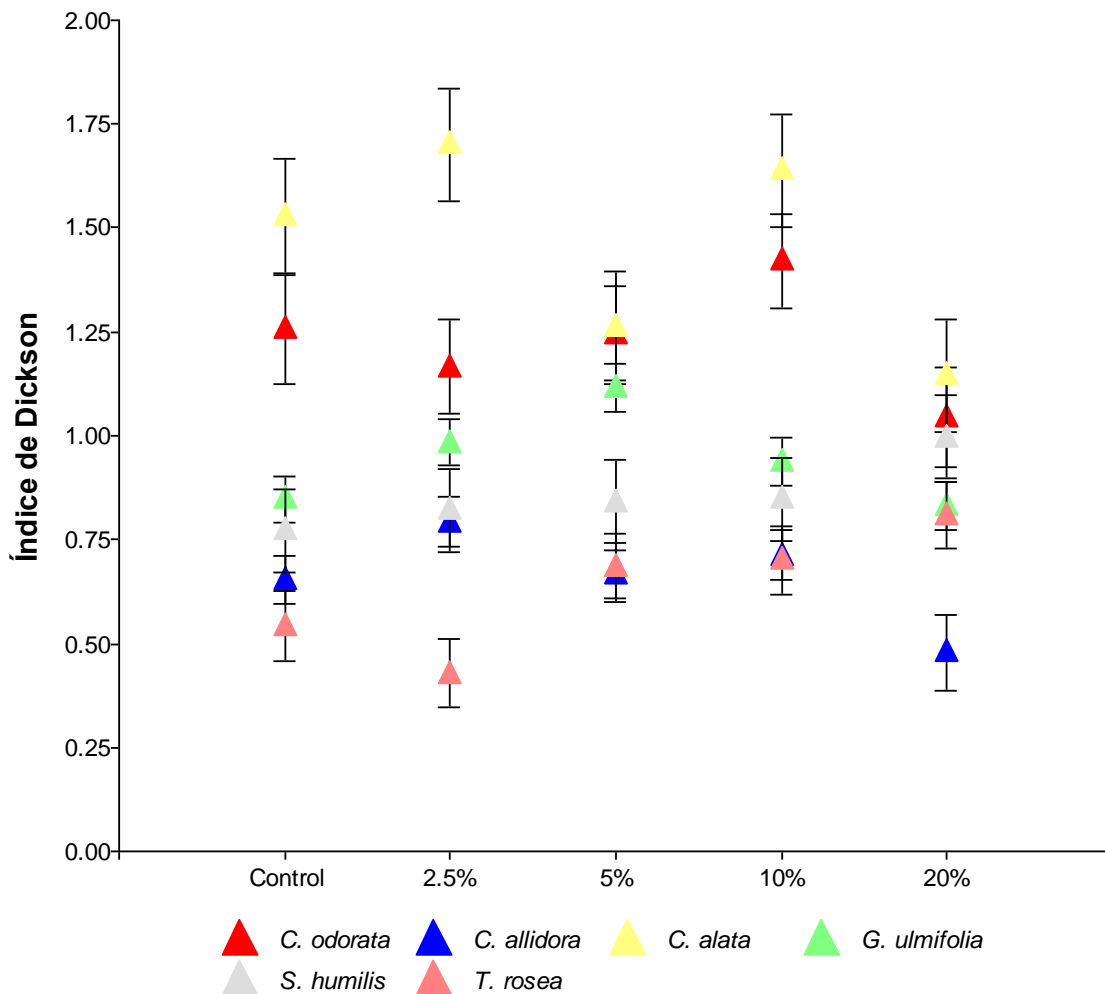
esta teoría establece que *G. ulmifolia* es la especie con alta supervivencia, dado su peso seco total, seguido de *C. odorata*.

Al finalizar la investigación presuntamente la adición de una cantidad moderada de enmiendas orgánicas en forma de biochar proporciona una mejora en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En la figura se refleja claramente el aporte que da el biochar como fertilizante agregándose en dosis bajas, en este caso los mejores efectos se muestran en los tratamientos que contienen menores proporciones de biochar.

Según Lehmann et al. (2011) las propiedades del biochar, lo convierte un producto interesante como enmienda de suelo mejorando las características donde se adiciona. Estos incluyen la reducción de su densidad aparente, el aumento de su capacidad de retención de agua, la mejora de su estructura, un aumento de la porosidad y permeabilidad del suelo.

El peso seco de las plántulas se correlaciona con la supervivencia y el crecimiento del campo con el mismo nivel de consistencia que el diámetro al cuello de la raíz (Thompson, 1984), dado que indica la distribución de la biomasa entre los diferentes órganos de las plántulas.

**8.4. Determinar el efecto del Biochar sobre el Índice calidad de Dickson (ICD) en las seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.**



**Figura 16. Efectos del biochar sobre el índice de Dickson de las plántulas**

Se encontró diferencias significativas entre especie y tratamiento para el índice de calidad de plántulas Dickson ( $F = 2.47$ ;  $P = 0.0004$ ). El Índice de Calidad de Dickson (ICD), es el mejor parámetro para indicar la calidad de planta, ya que expresa el equilibrio de la distribución de la masa y la robustez, lo que evita seleccionar plantas más altas pero débiles y descartar ejemplares de menor altura, pero con mayor vigor (García, 2007). En este estudio, únicamente *T. rosea* y *C. allidora* en 2.5% y 20% respectivamente presentaron una calidad de plántulas media, mientras que, para el resto de las especies en todos los tratamientos, mostraron un ICD superior o igual a 0.5 lo que indica que son plántulas de alta calidad. En este sentido, Rueda-Sánchez et al. (2014) propone valores específicos para la calidad de las plántulas según el índice de Dickson, siendo plántulas de baja calidad

aquellas con  $ICD < 0.2$ , entre 0.2 - 0.4 plántulas de media calidad, mientras que plántulas con  $ICD \geq 0.5$  indican plántulas de alta calidad.

(Lanuza, Casanoves, & Vilchez, sin publicar ) en otro estudio de crecimiento de plántulas bajo diferentes dosis de riego y fertilización, encontraron que únicamente el riego influyó significativamente el ICD, las plántulas de *C. odorata* y *S. humilis* presentaron ICD promedio entre 0.5 a 1, pero en ambas especies el índice fue superior cuando el riego era frecuente. Es decir, el riego es una variable clave que determina el crecimiento óptimo de las plántulas en vivero.

Finalmente, los resultados de esta investigación coinciden con el hecho de que el biochar como enmienda de suelo, tiene un gran potencial para ser usados en las prácticas de restauración ecológica de suelos degradados. Es decir, mediante su incorporación en la producción de plántulas en vivero, se pueden producir plántulas de óptima calidad que tendrán mayor capacidad de establecimiento en campo.

## CAPÍTULO V

### IX. CONCLUSIONES

Las plántulas produjeron mayor biomasa seca de tallo, hoja y total en suelo con 2.5% de biochar, mientras que produjeron mayor biomasa de raíz en el tratamiento de 10% biochar.

La especie que mejor respondió a todos los tratamientos y presentó los valores más altos en la mayoría de las variables fue *G. ulmifolia*, seguido de *C. alata* y *C. odorata*.

Las especies que presentan alto índice de robustez son *G. ulmifolia* y *C. alliodora* por lo que son clasificadas de calidad alta para su sobrevivencia en campo. En cuanto las demás especies son clasificadas de calidad media.

La calidad de las plantas forestales en invernadero es, clasificadas de media a alta, en cuanto a las características morfológicas; siendo de suma importancia si las plantaciones se realizan en suelos degradados.

La especie *C. alata* fue la que presentó mejor índice de Dickson indicando que tiene alta calidad para su sobrevivencia en campo.

## **X. RECOMENDACIONES**

Se recomienda que se pueda dar continuidad a este trabajo con el fin de analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo para entender los mecanismos por los cuales la adición del biochar al suelo contribuye al crecimiento y desarrollo de las plantas de las especies estudiadas. Adicionalmente se recomienda que, para cálculos de otras variables, la realización de estudios de suelo y biochar para determinar las cantidades de macro y micronutrientes que se poseen.

Se recomienda para los interesados en la plantación de especies forestales en campo, la aplicación de 35.15 g de biochar por planta en vivero. Así, para establecer una hectárea de árboles maderables, mediante una plantación compacta, con un marco de plantación de 3m x 3m (1111 plántulas/ha aproximadamente), se deberán incorporar unos 39.05 kg de biochar (85.91 lb).

## XI. Bibliografía

- Aker Narváez, C. E. (2014). Evaluación del uso de estufas ecológicas, análisis de la producción y uso del biocarbón como enmienda del suelo en los rendimientos de maíz (*Zea mays*) en tres municipios de León, Nicaragua.
- Albuquerque, J., Calero, J., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M., Gallardo, A., & Villar, R. (2013). El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. In S. E. d. C. Forestales (Ed.), (pp. 10). España: 6º Congreso Forestal Español
- Álvarez-Holguín, A., Morales-Nieto, C. R., Corrales-Lerma, R., Avendaño-Arrazate, C. H., Rubio-Arias, H. O., & Villarreal-Guerrero, F. (2018). Caracterización estomática, concentración de clorofila y su relación con producción de biomasa en *Bouteloua curtipendula*. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA*, 29(2), 251-261.
- Arnold, M. A. (1996). Mechanical correction and chemical avoidance of circling roots differentially affect post-transplant root regeneration and field establishment of container-grown shumard oak. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(2), 258-263.
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hips, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1-2), 1-18.
- de AGUIAR, I. (1973). *Influência do recipiente na produção de mudas e no desenvolvimento inicial após o plantio no campo, de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden e Eucalyptus saligna Smith*.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Tablada, E., & Robledo, C. (2015). Grupo InfoStat FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Di Rienzo, J., Macchiavelli, R., & Casanoves, F. (2011). *Modelos lineales mixtos: Aplicaciones en InfoStat* (1 ed.). Córdoba, Argentina.
- Dickson, A., Leaf, A. L., & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10-13.
- Edenborn, S., Edenborn, H., Krynock, R., & Haug, K. Z. (2015). Influence of biochar application methods on the phytostabilization of a hydrophobic soil contaminated with lead and acid tar. *Journal of environmental management*, 150, 226-234.
- Fonseca, É. d. P., Valéri, S. V., Miglioranza, É., Fonseca, N. A. N., & Couto, L. (2002). Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. *Revista árvore*, 26(4), 515-523.
- Fowles, M. (2007). Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 426-432.
- García-Figueroa, M., & Vargas-Hernández, J. (1999). Growth and biomass allocation of *Gliricidia sepium* seed sources under drought conditions. *Journal of Sustainable Forestry*, 10(1-2), 45-50.
- García, M. d. I. A. (2007). Importancia de la calidad del plantín forestal. *XXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Área Forestal de la EEA Concordia del INTA. Concordia, Entre Ríos, Argentina*.

- Glaser, B., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). Black carbon in sustainable soils of the Brazilian Amazon region. *Understanding and managing organic matter in soils, sediments and waters.* (Eds RS Swith, KM Spark) pp, 359-364.
- González, K. (1995). Tipos de envases en viveros forestales. *México: INIFAPSAGARPA*, 26-36.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (6 ed.). Mexico, DF: México: McGraw-Hill.
- Hunt, G. A. (1990). *Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings*. Paper presented at the Target seedling symposium, meeting of the western forest nursery associations, general technical report RM-200.
- Johnson, J. D., & Cline, M. L. (1991). Seedling quality of southern pines *Forest regeneration manual* (pp. 143-159): Springer.
- Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., & Xu, X. (2009). Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(2), 210-219.
- Lanuza, O., Casanoves, F., & Vilchez, S. (sin publicar ). Efecto del riego y la fertilización sobre la calidad de plántulas forestales con potencial uso para restauración.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management*: Earthscan London.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *Biological approaches to sustainable soil systems*, 113(517), e530.
- Leiva, J., Rocha, O., Mata, R., & Gutiérrez-Soto, M. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. II. La vegetación en relación con el suelo. *Revista de Biología Tropical (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)*, Vol. 57(3), 817-836.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'neill, B., . . . Petersen, J. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
- Major, J. (2011). Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. *línea <http://biochar-atlantic.org/assets/pdf/BiocharSoilFertility.pdf>*. Consulta, 3.
- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). *Target seedling concepts: height and diameter*. Paper presented at the Proceedings, western Forest nursery association.
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K., . . . Busscher, W. J. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*.
- Peguero, G., Lanuza, O. R., Savé, R., & Espelta, J. M. (2012). Allelopathic potential of the neotropical dry-forest tree *Acacia pennatula* Benth.: inhibition of seedling establishment exceeds facilitation under tree canopies. *Plant Ecology*, 213(12), 1945-1953.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., . . . Cornelissen, J. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/BT12225>
- R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. from <https://www.R-project.org/>

- Rodríguez, R. E. (1990). *Análisis de algunos elementos básicos involucrados en la producción artificial de plantas de especies nativas*. Paper presented at the Bosque, Chile.
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. d. D., Saenz-Reyez, J., Muñoz Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., & Orozco Gutiérrez, G. (2014). Calidad de planta producida en los viveros forestales de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(22), 58-73.
- Sáenz, R., Villaseñor, R., Muñoz, F., Rueda, S., & Prieto, R. (2010). *Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán* (Vol. 17). México.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., & Bol, R. (2009). Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. *CSIRO Land and Water Science Report*, 5(09), 17-31.
- Steiner, C. (2010). Las perspectivas de biocarbón: secuestro de carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía. *Revista Palmas*, 31.
- Thies, J. E., & Rillig, M. C. (2012). Characteristics of biochar: biological properties *Biochar for environmental management* (pp. 117-138): Routledge.
- Thompson, B. E. (1984). *Seedling morphological evaluation: what you can tell by looking*. Paper presented at the Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major tests, Oregon State University.
- Toral, I. (1997). Concepto de calidad de plantas en viveros forestales. *Documento técnico*, 1.

## XII. ANEXOS

### CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Descripción	Año 2019																																										
	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre		
Preparación de sustratos	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4				
Recolección de materia prima	■	■	■																																								
Quema	■	■	■																																								
Trituración							■	■	■																																		
Tamizado de carbon																																											
Recolecta de suelo											■	■																															
Tamizado de suelo											■	■																															
Recolección de la semilla																																											
Preparación de los sustratos																																											
Llenado de bolsas																																											
Siembra en semilleros																																											
Traslado de bolsas a invernadero																																											
Determinación de Capacidad de campo por sustrato																																											
<b>Establecimiento de experimento</b>																																											
Trasplante de plántulas a invernadero																																											
Codificación por tratamientos																																											
Riego																																											
Medición de altura, diámetro y número de hojas																																											
Control de plaga																																											
<b>Elaboración de documento</b>																																											
Documentación sobre el tema																																											
Elaboración de Protocolo																																											
Defensa de Protocolo																																											
Elaboración de Monografía																																											
Defensa de Monografía																																											



Recolección de materia prima



Preparación de materia prima



Pirólisis





**Cribado de Biochar**



**Suelo cribado**



**Preparación de sustratos**





Llenado de bolsas



Trasplante



Trasplante



## Diseño de tabla para recolección de datos

**Tema: Efectos del Biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia en invernadero de plántulas de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados.**

Especie	id	hoja i	altura i	Ø i	Especie	id	hoja i	altura i	Ø i	Especie	id	hoja i	altura i	Ø i
Crecuj	1				Swihum	11				Guaulm	1			
Crecuj	2				Swihum	12				Guaulm	2			
Crecuj	3				Swihum	13				Guaulm	3			
Crecuj	4				Swihum	14				Guaulm	4			
Crecuj	5				Swihum	15				Guaulm	5			
Crecuj	6				Swihum	16				Guaulm	6			
Crecuj	7				Swihum	17				Guaulm	7			
Crecuj	8				Swihum	18				Guaulm	8			
Crecuj	9				Swihum	19				Guaulm	9			
Crecuj	10				Swihum	20				Guaulm	10			
Crecuj	11				Corall	1				Guaulm	11			
Crecuj	12				Corall	2				Guaulm	12			
Crecuj	13				Corall	3				Guaulm	13			
Crecuj	14				Corall	4				Guaulm	14			
Crecuj	15				Corall	5				Guaulm	15			
Crecuj	16				Corall	6				Guaulm	16			
Crecuj	17				Corall	7				Guaulm	17			
Crecuj	18				Corall	8				Guaulm	18			
Crecuj	19				Corall	9				Guaulm	19			
Crecuj	20				Corall	10				Guaulm	20			
Cedora	1				Corall	11								
Cedora	2				Corall	12								
Cedora	3				Corall	13								
Cedora	4				Corall	14								
Cedora	5				Corall	15								
Cedora	6				Corall	16								
Cedora	7				Corall	17								
Cedora	8				Corall	18								
Cedora	9				Corall	19								
Cedora	10				Corall	20								
Cedora	11				Tabros	1								
Cedora	12				Tabros	2								
Cedora	13				Tabros	3								
Cedora	14				Tabros	4								
Cedora	15				Tabros	5								
Cedora	16				Tabros	6								
Cedora	17				Tabros	7								
Cedora	18				Tabros	8								
Cedora	19				Tabros	9								
Cedora	20				Tabros	10								
Swihum	1				Tabros	11								
Swihum	2				Tabros	12								
Swihum	3				Tabros	13								
Swihum	4				Tabros	14								
Swihum	5				Tabros	15								
Swihum	6				Tabros	16								
Swihum	7				Tabros	17								
Swihum	8				Tabros	18								
Swihum	9				Tabros	19								
Swihum	10				Tabros	20								

Fecha:

Tratamiento:

Anotador:

Medidor: