



Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Escuela de Ingeniería Forestal
Departamento de Tecnología de Productos Forestales



**Efecto del biocarbón biológicamente activado en el desarrollo inicial
en plantas del género *Corymbia***

Trabajo de grado, modalidad pasantías, como requisito para optar por el título de Ingeniero
Forestal

Bdigital.ula.ve

Realizado por:

Br. Arianny Tellez Alizo

Tutor Académico: Prof. Cataldo Lombardo

Tutor Institucional: Ing. José Bastidas

Mérida, Junio de 2024

C.C Reconocimiento

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Dios, por haberme dado la vida, la salud y la inteligencia para culminar este importante logro académico. Gracias por ser mi guía y fortaleza en cada paso del camino.

A mi familia.

Quiero extender mi más sincero agradecimiento a mi querida familia, quienes han sido mi apoyo incondicional y mi mayor motivación a lo largo de mi vida. A mi abuela, mis tías, tíos, primas y primos, mis sobrinos, mi hermana y especialmente a mi madre *Otilia Alizo* por ser esa fuente inagotable de amor incondicional.

A mi casa de estudio.

Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, agradezco a esta institución por haberme abierto las puertas al conocimiento, por haberme rodeado de profesores excepcionales y por haberme proporcionado las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.

A mis tutores.

Profesor Cataldo Lombardo e Ingeniero José Bastidas, gracias a ambos por su confianza en mí, por sus valiosos consejos y por haberme impulsado a dar lo mejor en este proyecto.

A DEFORSA

Agradecida con la empresa Desarrollos Forestales San Carlos por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales en su respetada organización. Esta experiencia ha sido invaluable y ha marcado mi vida de manera significativa.

A mis amigos.

Agradezco a cada uno de ustedes por su amistad, apoyo y compañerismo. Han sido mi pilar fundamental durante estos años, compartiendo conmigo alegrías, tristezas, éxitos y fracasos. He aprendido mucho de cada uno, tanto a nivel personal como profesional.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

Introducción	10
Planteamiento del problema	12
Justificación.....	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14

CAPITULO II

Marco teórico	15
Definiciones.....	15
Biomasa.....	15
Biocarbón.....	15
Proceso de Obtención del Biocarbón.....	16
La Pirólisis.....	16
Pirolisis Rápida.....	17
Pirolisis Lenta.....	17
Torrefacción.....	18
Gasificación.....	18
Variables que Afectan el Proceso de Pirolisis.....	18
Composición del sustrato.....	18
Temperatura.....	18
Intervalo de Calentamiento.....	19
Características del biocarbón.....	19
El Área Superficial.....	19

El pH.....	19
Grupos funcionales.....	20
Definiciones de Sustratos.....	20
El Suelo.....	20
Compostaje.....	20
Abonos fermentados del tipo Bocashi.....	20
Bioactivadores.....	21
Indicadores de calidad.....	21
Descripción botánica de <i>Corymbia citriodora</i> y <i>Corymbia torelliana</i>	22
Antecedentes relativos al biocarbón.....	23
CAPITULO III	
Metodología.....	27
Ubicación del área de estudio.....	27
Materiales y equipos.....	28
Descripción del proceso de carbonización en horno tipo colmena brasileño.....	28
Diseño del horno tipo colmena brasileño.....	28
Proceso de carbonización del material utilizado.....	29
Activación del biocarbón.....	36
Diseño experimental.....	38
Registro de datos.....	39
Procesamiento estadístico.....	39
Croquis, tratamientos dispuestos en campo.....	40
CAPITULO IV	
Discusión de resultados.....	41
Rendimiento del carbón.....	41

Evaluar los efectos del biocarbón sobre las características morfológicas y la supervivencia de las plantas.	41
Incremento de la altura de las plantas.....	43
Incremento del diámetro de las plantas	46
CAPITULO V	
Conclusión.....	50
Recomendaciones.....	51
Referencias Bibliográficas	52
ANEXOS.....	59

Bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de <i>Corymbia citriodora</i> (Hook.) KD Hill & L.A.S. Johnson.....	22
Tabla 2. Descripción de <i>Corymbia torelliana</i> (F.Muell.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson.	23
Tabla 3. Datos de la madera utilizada para la carbonización.	30
Tabla 4. Porcentaje de los tratamientos y el peso en Kg.....	37
Tabla 5. Plantas sobrevivientes en las primeras fases de su establecimiento.	41
Tabla 6. Análisis de varianza para el incremento en altura de las plantas.	43
Tabla 7. Estadísticas descriptivas del incremento de altura de las plantas.	44
Tabla 8. Análisis de varianza para el incremento del diámetro de las plantas.	47
Tabla 9. Estadísticas descriptivas del incremento del diámetro de las plantas.	47

Bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	27
Figura 2. Vista frontal del horno tipo colmena brasileño.	29
Figura 3. Vista lateral del horno tipo brasileño	29
Figura 4. Madera de Corymbia apilada destinada para carbón.	30
Figura 5. Medición del contenido de humedad de la madera.....	31
Figura 6. Camión con la madera cubicada para ser transportada.	31
Figura 7. Arreglo de madera dentro del horno tipo colmena brasileño	32
Figura 8 Entrada sellada y abertura de encendido del horno tipo colmena.	33
Figura 9. Control de temperatura por abertura en la puerta del horno.	34
Figura 10. Apertura del horno y descarga del carbón.....	36
Figura 11. Medición del carbón en un contenedor de un metro cúbico.	36
Figura 12. Croquis, tratamientos dispuestos en campo.	40
Figura 13. Pérdidas de las plantas en el ensayo por afectaciones externas.	42
Figura 14. Incremento en promedio de la altura de las plantas.	45
Figura 15. Prueba Tukey de comparación de medias para el incremento de altura de las plantas ..	46
Figura 16. Promedios del incremento de los diámetros en mm de las plantas.	48
Figura 17. Prueba de Tukey del incremento del diámetro de las plantas	49

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Tamizado del carbón.	59
ANEXO 2. Preparación de los tratamientos.....	59
ANEXO 3. Preparación del terreno.....	60
ANEXO 4. Aplicación del biocarbón y el hidrogel.....	60
ANEXO 5. Siembra de plantas de Corymbia.	61
ANEXO 6. Medición de diámetro y altura.....	61
ANEXO 7. Afectaciones por agentes externos.	62

Bdigital.ula.ve

CAPÍTULO I

Introducción

El biocarbón es un material sólido poroso y el elemento principal que lo compone es el carbono. Se forma por procesos termoquímicos de biomasa, a partir de desechos vegetales o animales, en ausencia o bajo una atmósfera limitada de oxígeno (Kumar et al., 2021).

En el contexto del crecimiento demográfico acelerado y las crecientes actividades antropogénicas, la generación de residuos se ha convertido en un desafío ambiental de gran magnitud. La búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de estos residuos ha impulsado el desarrollo de campos de investigación innovadores, y uno de ellos es la producción de biocarbón (Kumar, et al. 2023).

El biocarbón se presenta como una estrategia viable para la transformación de biomasa residual de los sistemas agroforestales, que tiene las ventajas de recircular nutrientes y mejorar las condiciones físico químicas y biológicas de suelo, además que se convierte en una herramienta para mitigar el impacto del cambio climático (Iglesias, 2018).

El uso del biocarbón brinda la oportunidad de potenciar la productividad del suelo y optimizar la eficiencia mediante el aprovechamiento de recursos disponibles, obtenidos de materiales renovables y sostenibles. Y para que este tenga efecto en el suelo, es necesario cargar o modificar el biocarbón para que se vuelva biológicamente activo, a fin de utilizar eficientemente sus propiedades (García, et al., 2021).

En este estudio el biocarbón se utilizaría en un ensayo en plantación en plantas del género *Corymbia*, es decir los individuos a usar en campo son el cruce genético entre *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill & LAS Johnson y *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson. Estos árboles común mente llamados por su género *Corymbia* son árboles nativos de Australia, que se ha adaptado bien a las condiciones climáticas de Venezuela. Son especies de rápido crecimiento y alta productividad, que tiene un gran potencial para el desarrollo forestal sostenible.

En la última década se han desarrollado más de 23800 publicaciones alrededor del mundo referente a los biocarbones; China fue el país que publicó el mayor número de artículos (11762), seguido de EE. UU (3556), India (1493), Australia (1420) y Corea del Sur (1216) (Kumar et al., 2023). En Latinoamérica se podría citar a países como Brasil, Argentina y México donde se han estudiado este tipo de materiales; Brasil ha sido pionero en las investigaciones de: análisis de captura de carbono, mitigación por parte de biocarbones en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Reyes, 2018).

En el país los estudios relacionados con biocarbones son nacientes y se tiene poca información relacionada con los efectos que pueda tener en los suelos y en plantaciones. Sin embargo, algunos investigadores (López, et al. 2022; Aponte y Rodríguez, 2021; Palma, 2016) han realizado revisiones del tema sobre la caracterización y evaluaciones de este material.

Bdigital.ula.ve

Planteamiento del problema

En la empresa Desarrollos Forestales San Carlo II, el manejo de residuos provenientes de cosecha y aserradero es dirigido a la producción de carbón vegetal. Sin embargo, en el proceso de empacado de este material se genera una acumulación importante de carbonilla o ripio, viables para ser aprovechado como biocarbón. La concentración de este tipo de residuos puede causar efectos negativos en el ambiente, riegos de incendios y problemas de salud debido a las partículas de carbón que se dispersan en el aire.

La mayoría de investigaciones relacionadas con biocarbón se han enfocado en su aplicación como mejorador de suelos para cultivos agrícolas. Por lo que se hace evidente, que aún las aplicaciones en el campo forestal están en sus primeras etapas y se necesita más investigación para determinar las dosis óptimas, los tipos de biocarbón más adecuados y los efectos a largo plazo en las plantaciones. Además en el país no hay estudios que documenten sobre el uso del biocarbón en ninguno de estos campos por lo que es conveniente realizar ensayos para evaluar la viabilidad técnica y económica de esta propuesta.

Justificación

La transformación de biomasa forestal en productos como biocarbón, se convierte en una alternativa de gestión para el aprovechamiento de residuos y para la recuperación de los suelos como estructurador o biofertilizante, tal como menciona Wang y Wang (2019). El biocarbón se presenta como una opción novedosa en la remediación del deterioro de los suelos y como estrategia para minimizar los efectos del cambio climático, ya que presenta beneficios, tales como mejora del suelo, secuestro de carbono, realización de compostas a partir de residuos sólidos orgánicos, descontaminación del agua, como catalizador y depurador, entre otros (Aponte y Rodríguez, 2021).

Este trabajo pretende aportar información relativa al aprovechamiento del biocarbón como estructurador y biofertilizante del suelo, para ser aplicado en la etapa de desarrollo inicial de plantas del género *Corymbia* en un ensayo en plantación, debido a la necesidad de implementar un sistema de gestión eficiente de la biomasa derivada del aprovechamiento forestal, y del empacado del carbón, ya que contribuirá a reducir el riesgo de incendios, contaminación del aire y problemas de salud.

La gestión de residuos forestales debe avanzar hacia una economía circular, aprovechando al máximo las materias primas y las fuentes de energía disponibles, así no solo se estará contribuyendo a buscar alternativas en cuanto al aporte de materia orgánica y nutrientes al suelo, sino que implicará a una eliminación racional de residuos en los diferentes ecosistemas donde pueden ocasionar diversos problemas (Reyes, 2018).

El aprovechamiento de los residuos que se generan en otras áreas de manejo de la empresa DEFORSA, como los residuos generados en ganadería y el material orgánico proveniente de cocina (cascaras de frutas y verduras). Esto permitiría utilizarlos como bioactivadores o mejoradores en el proceso de activación del biocarbón.

La investigación propuesta es relevante para el campo de la gestión forestal sostenible, ya que contribuye a evaluar las posibilidades de la utilización de biocarbón para la mejora de la productividad forestal. Además de contribuir a la base de conocimientos existente sobre el biocarbón, y proporcionar información valiosa sobre su aplicación en el cultivo de la *Corymbia*.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto del biocarbón biológicamente activado como mejorador de suelos a corto plazo, para el desarrollo inicial de plantas del género *Corymbia* K.D. HILL & L.A.S. JOHNSON, en plantaciones forestales

Objetivos específicos

- Describir el proceso de carbonización del material usado para la elaboración del biocarbón.
- Activar el carbón a partir de diferentes mejoradores o bioactivadores.
- Evaluar los efectos del biocarbón activado biológicamente sobre la sobrevivencia y las características morfológicas de las plantas.
- Comparar el tratamiento más efectivo según el crecimiento en altura y diámetro de las plantas de *Corymbia*.

Bdigital.ula.ve

CAPÍTULO II

Marco teórico

Definiciones

Biomasa.

La biomasa se refiere a todo aquel material biológico derivado de organismos vivos utilizada para diferentes aplicaciones. En el caso de la biomasa lignocelulósica formada por polímeros de carbohidratos (hemicelulosas y celulosa) y polímeros aromáticos (lignina) (Li et al., 2020, Yaashikaa et al., 2019; Yaashikaa et al., 2020) puede convertirse termoquímicamente en sólido biocarbón, gas (gas de síntesis) y productos líquidos ácido piroleñoso y alquitrán.

Biocarbón.

El biocarbón es un material sólido poroso y el elemento principal que lo compone es el carbono, se forma por procesos termoquímicos de biomasa, a partir de desechos vegetales o animales, en ausencia o bajo una atmósfera limitada de oxígeno (Kumar et al., 2021). Sin embargo, en la literatura se pueden encontrar numerosas definiciones de biocarbón; por ejemplo, Lehmann y Joseph (2009) definen que se trata de un producto sólido de grano fino y poroso, obtenidos de algún tipo de biomasa a través de una transformación termoquímica con un limitado porcentaje de oxígeno, similares al carbón producido por quema natural. En el mismo orden de idea la Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI) estandarizó el concepto como “un material sólido generado mediante la conversión termoquímica de biomasa en condiciones de oxígeno limitado”. El biocarbón y el carbón vegetal se obtienen a partir de una ruta de producción similar a través del proceso de pirólisis, sin embargo, el biocarbón y el carbón vegetal se pueden diferenciar por su material inicial y por su aplicación final. Otra definición otorgada la establece el Certificado Europeo de Biocarbón (EBC), (2020) quienes describen el biocarbón como “un material carbonoso poroso que se produce por pirólisis de biomasa y se utiliza de tal manera que el carbono contenido sirve como sumidero de carbono a largo plazo.

Proceso de Obtención del Biocarbón.

El biocarbón puede obtenerse a partir de un amplio rango de materia orgánica, (residuos agrícolas, forestales, estiércoles, entre otros), cuyas características van a determinar las propiedades fisicoquímicas del biocarbón producido (Gonzales, et al. 2020).

Figuroa, (2019) describe que existen diferentes tecnologías termoquímicas para la transformación de la biomasa y otros materiales orgánicos. Según la materia prima y el proceso termoquímico utilizados, los productos y sus propiedades varían. El proceso de transformación es controlado por parámetros como: temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.

Los procesos termoquímicos son la base para la obtención del biocarbón, estas se pueden clasificar en pirólisis lenta, pirólisis rápida, y gasificación (Guel-Najar, 2023). Tanto la pirólisis como la gasificación son tecnologías para transformar de diversas materias primas en diferentes productos, tales como bio-aceite, biocarbón y gas de síntesis, (Reyes, 2018).

La Pirólisis.

Es la transformación térmica de la biomasa por medio del calor en condiciones anaeróbica (ausencia de agentes oxidantes), como resultado de este proceso se obtienen productos sólidos, líquidos y gaseosos denominados como: biocarbón, bioaceite y gas de síntesis (Escalante, 2016). De acuerdo a Pan, (2021), los parámetros físicos que influyen durante el proceso de pirólisis son: velocidad de calentamiento, atmósfera, presión, catalizadores, tipos de biomasa y temperatura final. La pirólisis se puede clasificar como pirolisis lenta, media y rápida, siendo la pirolisis lenta la que favorece el rendimiento de obtención del biocarbón.

Por otro lado, en el proceso termoquímico por pirolisis el rendimiento de los productos depende de la composición de la biomasa lignocelulósica usada, (celulosa, hemicelulosa y la lignina), ya que se descomponen a diferentes temperaturas, las cuales siguen diferentes mecanismos de reacción (Guel-Najar, 2023). La carbonización se presenta en un intervalo de temperaturas de 400 a 600°C, con tiempos de residencia desde horas hasta días. Flores y Quinteros (2008) describen que con el incremento de la temperatura se

produce la ruptura de los enlaces glucosídicos y por consiguiente una despolimerización parcial del componente celulósico de la madera. Las reacciones ocurridas a 100°C son endotérmicas debidas a la eliminación de la humedad. La emisión de gases se produce principalmente entre 200 y 400°C. Las hemicelulosas se descomponen fácilmente, entre 220°C y 315°C, la celulosa se degrada a temperaturas más altas entre 315 y 400°C, finalmente la lignina es más resistente a la degradación, ya que necesita entre los 160°C y los 900°C, lo que permite que se genere un residuo sólido importante, por tanto, se considera que el contenido de lignina influye en el rendimiento del carbón obtenido (Flores y Quinteros, 2008)

Pirolisis Rápida.

Es la descomposición termoquímica de la biomasa llevada a cabo en un rango de temperatura de 300 °C y 650 °C con rápido calentamiento, la pirólisis implica una ruptura de moléculas grandes y complejas en varias moléculas más simples y pequeñas (menor peso molecular). Los productos resultantes se clasifican en tres tipos: líquido (compuestos oxigenados, aromáticos, agua, productos de bajo grado de polimerización, alquitranes), sólido (carbón) y gases (que incluyen CO₂, H₂O, CO, C₂ H₂, C₂H₄, C₂H₆ y C₆H₆). Las cantidades relativas de estos productos dependen de las condiciones del proceso y composición química de la materia prima procesada, se resalta la importancia de la velocidad de calentamiento y la temperatura final alcanzada por la biomasa. El principal motivo de la pirólisis rápida es maximizar la producción de líquidos, mientras se minimiza el rendimiento de carbón (López, et al 2019)

Pirolisis Lenta.

Es un proceso que se lleva a cabo a temperaturas entre los 300 °C y los 700°C, con velocidades de calentamiento lentas y tiempos de reacción que van desde horas hasta días, la pirólisis lenta se ha evidenciado como la tecnología termoquímica con la que se obtienen los mayores porcentajes de productos sólidos con aproximadamente un 35 % de biocarbón (Reyes, 2018).

Torrefacción.

La torrefacción es un proceso lento realizado a temperaturas entre los 225 °C y los 300°C. Se realiza con el objetivo de aumentar la densidad de energía y las propiedades de la biomasa. El producto final es un material sólido, seco y ennegrecido que se encuentra libre de sustancias volátiles (Bastidas, 2019)

Gasificación.

La gasificación es la conversión térmica de material orgánico en gases de combustión por la oxidación parcial de la madera a altas temperaturas, generalmente en un rango de 600 a 1.000 °C. Se requiere un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor o sus combinaciones), el cual reacciona con el carbono sólido y los hidrocarburos más pesados (compuestos oxigenados como fenoles y ácidos; líquidos como alquitrán, aceite y nafta) de la madera para convertirlos en gases de bajo peso molecular como CO y H₂ (López, 2019). La Tabla 1 describe algunas variables de la pirolisis y sus productos.

Variables que Afectan el Proceso de Pirolisis.**Composición del sustrato.**

La biomasa utilizada para la producción de biocarbón se compone de materiales complejos y heterogéneos de diferentes fuentes. Su estructura y composición varían según la especie de la que se deriva, y estas composiciones son responsables de la variedad y complejidad de los productos formados durante la pirolisis (Segura, 2018).

Temperatura.

La temperatura es una de las variables más importantes dentro del proceso de pirolisis, la cual define la obtención de los productos, es decir el aumento en la temperatura favorecen la formación de gases no condensables mientras que si esta se disminuye se favorece la producción de carbonizado; es decir se obtiene mayor cantidad de Biochar (Urien, 2013).

Intervalo de Calentamiento.

Este parámetro representa el aumento de temperatura por segundo que, junto con la duración del calentamiento y su intensidad, afecta la velocidad, el grado, la secuencia de las reacciones de pirólisis y la composición de los productos resultantes. Las reacciones tienen lugar en un amplio rango de temperaturas; Por lo tanto, los productos formados inicialmente tienden a transformarse y descomponerse aún más en una serie de reacciones secuenciales. Cuanto menor sea el rango de temperatura, mayor será la producción de biocarbón (Urien, 2018)

Características del biocarbón.

Cada biocarbón varía significativamente dependiendo de la biomasa de la cual proviene. Sin embargo las condiciones de pirólisis son por lo general las mismas. El biocarbón tiene un alto contenido de carbono (C), en su mayor parte condensado en anillos aromáticos lo que le confiere su elevado potencial de secuestro de carbono. También cabe destacar los nutrientes asociados a esta fracción mineral son K, Ca, Mg, P, S. En cuanto al pH la mayoría de biocarbones tienden a ser alcalino ($\text{pH} > 7$) y si se aplican al suelo, pueden ejercer un efecto de encalado (Gonzales et al, 2020).

El Área Superficial.

En El biocarbón es importante su porosidad, entre más pequeño es el poro mayor será su área superficial (Ahmad y col., 2014; Leng y col., 2021). Al incrementar la temperatura de pirólisis, aumenta el área superficial y el volumen de poros del biocarbón, debido a que las altas temperaturas eliminan y agrietan las sustancias que bloquean los poros dando lugar a una superficie más amplias (Ahmad y col., 2014; Tomczyk y col., 2020).

El pH.

Es una característica muy importante a considerar debido a que es un determinante directo sobre los efectos de la relación suelo – biochar – planta y el pH resultante dependerá de la materia prima original y de las condiciones operacionales. En cuanto al pH la mayoría

de biocarbones tienden a ser alcalino ($\text{pH} > 7$) y si se aplican al suelo, pueden ejercer un efecto de encalado (Lehmann & Joseph, 2009).

Grupos funcionales.

Al calentar la biomasa a temperaturas de entre $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ sus enlaces químicos se rompen y reordenan, provocando la formación de nuevos grupos funcionales entre los que se encuentran los grupos carboxilo, quinona, éter, hidroxilo, anhídrido, pirona, piridina, fenol, entre otros más (Tomczyk y col., 2020).

Definiciones de Sustratos

El Suelo

Soil Survey Staff (1999) se define al suelo como “Un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases presente en la superficie terrestre. El suelo se caracteriza por presentar horizontes o capas que se diferencian por el resultado de adiciones, pérdidas, translocaciones del material inicial. A su vez, Rodríguez (2013) complementa este concepto alegando que la formación del suelo se da a través de procesos físicos, químicos y biológicos por meteorización del material parental y la mineralización de la materia orgánica en largos periodos de tiempo.

Compostaje.

El proceso se lleva a cabo naturalmente por la acción de organismos, humedad, condiciones aerobias, material de alimentación y nutrientes disponibles para el crecimiento microbiano; controlando estos factores, el proceso de compostaje puede ocurrir a un ritmo mucho más rápido. Se utilizan residuos orgánicos tales como hojas, rastrojos, zacates, cáscaras, residuos orgánicos caseros, subproductos maderables (aserrín y virutas, cortezas), ramas, estiércoles y residuos industriales de origen orgánico (López, et al 2019).

Abonos fermentados del tipo Bocashi

Además de residuos orgánicos, resulta fundamental la adición de levadura, harina de cualquier cereal, cenizas y biocarbón. A diferencia del compost convencional, para la

obtención de abono bocashi, el proceso sólo demora 21 días, con la salvedad de que una vez realizada la mezcla (incluyendo el aporte de agua hasta aproximarse al punto de capacidad de campo), en los siguientes días no se adiciona ningún material y, los tres primeros días, deben aplicarse dos volteos (uno en la mañana y uno en la tarde), posteriormente se aplica un solo volteo hasta el día 21, ya sea todas las mañanas, o todas las tardes, sin alternar los turnos. Esto con la finalidad de controlar factores claves como la aireación y la temperatura, la cual no debería exceder los 70 °C en el centro del apilado de la mezcla, con la finalidad de controlar patógenos, sin destruir microorganismos benéficos (Araujo, 2024).

Bioactivadores.

Un bioactivador o mejorador de suelo es cualquier material químico, biológico o físico (como fertilizantes elementales, composta estabilizada, estiércol, subproductos no fecales de origen animal, musgos de turba, desperdicios vegetales, lodos residuales, etc.) añadido al suelo con el objetivo de optimizar sus propiedades y, por ende, estimular el crecimiento de las plantas (Espinosa, 2011).

Indicadores de calidad.

Las plantas utilizadas en actividades forestales deben tener un origen genético acorde al objetivo de la plantación y las condiciones del área que serán establecidas, también deben cumplir con condiciones mínimas de calidad, es decir, con el conjunto de atributos que permitan garantizar su capacidad para establecerse y crecer exitosamente en el terreno. Además de las características genéticas que determinan la elección de las semillas, la calidad de las plantas depende en gran medida de cómo se cultivan en el vivero (Gonzales et al, 2020).

En resumen, la combinación de parámetros o características genéticas, morfológicas y fisiológicas determina la calidad de la planta, el éxito de su emergencia y el posterior desarrollo en el campo. Sin embargo, los rasgos morfológicos pueden correlacionarse exitosamente con la supervivencia y el crecimiento inicial en el campo de muchas especies forestales, teniendo en cuenta que generalmente cuanto más grande es la planta, mayor es su potencial de supervivencia (Gonzales et al, 2020).

Descripción botánica de *Corymbia citriodora* y *Corymbia torelliana*

Eucalyptus torelliana, *Eucalyptus citriodora* fueron reubicados taxonómicamente por Hill y Johnson (1995) como *Corymbia torelliana*, *Corymbia citriodora*, si bien su introducción en varias regiones del mundo data de hace muchos años, últimamente empezaron a revalorarse como una de las entidades con mayor potencial para la obtención de madera de calidad para distintos usos (López y Vera, 2018). Se describen ambas especies, debido a que el material genético que se utilizó en campo es el cruce genético entre *Corymbia citriodora* y *Corymbia torelliana* que lleva por nombre CTL 6745 en el presente estudio se menciona con su nombre común “CORYMBIA” la descripción de cada especie.

Tabla 1.

Descripción de Corymbia citriodora (Hook.) KD Hill & LAS Johnson

Características	
Familia	Myrtaceae
Nombre científico	<i>Corymbia citriodora</i>
Autor	(Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson
Nombre común	Corymbia
Origen	Nativa de Australia
Continente	Oceanía
En Venezuela	Introducida

Fuente: WFO (2024)

Tabla 2.

Descripción de Corymbia torelliana (F.Muell.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson.

Características	
Familia	Myrtaceae
Nombre científico	<i>Corymbia torelliana</i>
Autor	(F.Muell.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson
Nombre común	Corymbia
Origen	Nativa de Australia
Continente	Oceanía
En Venezuela	Introducida
Altura máxima (m)	20 a 30 m de altura

Fuente: WFO (2024)

Antecedentes relativos al biocarbón

Kumar, et al. (2023) presenta un análisis bibliométrico de la literatura científica sobre el biocarbón con el objetivo de proporcionar una visión general de las aplicaciones del biocarbón en la gestión ambiental. Los resultados muestran que la tendencia de la investigación y los documentos publicados en los últimos años: 2137 en 2018, 3034 en 2019, 3928 en 2020, 5236 en 2021 y 4172 en 2022, lo que indica que el biocarbón se ha convertido en un área clave de investigación, también sugiere el creciente interés, debido a la amplia aplicabilidad del biocarbón y el potencial para proporcionar una solución sostenible a la gestión de residuos y el cambio climático ,además de los beneficios como la remediación de suelos contaminados, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y la mejora de la calidad del agua.

Según Woods (2004), las primeras investigaciones que hacen referencia sobre biocarbón fueron descritas por Smith en 1879 y Harrt 1885, quienes detallan la existencia de unos suelos oscuros y fértiles en la Amazonia brasileña, aunque no pudieron precisar su

origen, las teorías se inclinan hacia una formación de tipo antropogénico. Los segmentos conocidos como suelos de tierras negras o Terra preta do indo, se han encontrado en gran proporción en la Amazonia y se identifican por presentar características completamente diferentes a los suelos encontrados en la región y por contener un gran almacenamiento de materia orgánica y altos niveles de nutrientes.

Amalina, *et al.*, (2022), En su estudio describe el uso del biocarbón asociados a la conservación del medio ambiente y la agricultura. El autor señala la amplia gama de aplicaciones del biocarbón, ya que está en continua expansión, principalmente en áreas industriales, agrícolas y operaciones relacionadas con el ambiente. Puede usarse como aditivo para el suelo, agregarse al forraje y ensilaje, o aplicarse en el tratamiento de depuración de aguas.

En el mismo orden de ideas, se resaltan los beneficios sobre los aspectos fisicoquímicos del suelo (Hossain *et al.*, 2020 y Singh *et al.*, 2022^a) describen que el producto tiene el potencial de aumentar el pH, la materia orgánica, la retención de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico, el área superficial entre partículas, la porosidad, la asociación microbiana y la capacidad de retención de agua del suelo. En consecuencia, la aplicación de biocarbón ayuda a aumentar la fertilidad del suelo y la productividad de las plantas. Además (Agarwal *et al.* 2022; Nath *et al.* 2022) mencionan que la aplicación de biocarbón también ayuda a mitigar el cambio climático, al secuestrar carbono y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, remediar contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo, el agua y el aire a través de rutas de adsorción y degradación. (Kumar y Bhattacharya 2021).

La amplia aplicabilidad del biocarbón y la gestión económica de los residuos posibilitan la reintegración de desechos valiosos en los sistemas agrícolas, fomentando una economía circular y juega un papel principal en el desarrollo sostenible a nivel global. Un beneficio adicional del biocarbón es que la materia prima para su producción proviene de residuos orgánicos, que a menudo causan problemas de contaminación ambiental (Escalante *et. al.*, 2016).

Existen experiencias positivas derivadas de la aplicación de biocarbón al suelo, que generan una mejora en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y se traduce en el aumento de la productividad de los cultivos. Una de estas experiencias realizada por Reyes (2018), proporciona evidencia de que el biocarbón es una alternativa viable para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que puede contribuir a la producción sostenible de alimentos y otros productos agrícolas.

En base a ello, Zamora (2020), detalla que la aplicación del biocarbón al suelo es una estrategia sostenible para aprovechar residuos de plantaciones forestales, por su potencial contribución con la mejora de las condiciones estructurales del suelo y como agente generador de condiciones favorables para la asimilación de nutrientes para las plantas.

Khan *et al.* (2015) recomiendan para aplicación como enmienda al suelo en investigaciones con biochar dosis de 2,5, 5 y 7,5 toneladas por hectárea. Iglesias (2018) empleó una dosis de 5 toneladas por hectárea para la aplicación de biochar (elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto) para evaluar la productividad del maíz en el austro ecuatoriano.

El biocarbón también podría desempeñar papeles cruciales en la restauración ambiental y la gestión agrícola, que son fundamentales para las estrategias de desarrollo global a largo plazo (Qin et al. 2022).

Actualmente se ha incorporado a tecnologías como la inteligencia artificial para seleccionar la materia prima adecuada para una producción más eficaz de biocarbón y sus posibles usos (Lakshmi et al. 2021; Khan et al. 2022). En otro estudio presentado por Shaikh et al. (2022b), desarrollaron un nanocompuesto a base de biocarbón procedente de residuos de hojas de té para la eliminación de tintes tóxicos.

En Venezuela los estudios sobre biocarbón son incipientes, como herramienta para el secuestro de carbono y aplicaciones en el suelo. Sin embargo, se han realizado investigaciones. López, et al. (2022), presenta la evaluación de la capacidad adsorbente del biocarbón obtenido mediante tecnologías apropiadas para la purificación de agua de lluvia. El estudio se realizó en el Centro de Investigación y Desarrollo Integral (CIDI) de la

Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Los autores obtuvieron biocarbón a partir de la pirólisis lenta de tallos de bambú, luego caracterizaron este material mediante un análisis de textura, micrografía y espectroscopia infrarroja. Para evaluar la capacidad adsorbente del biocarbón utilizaron azul de metileno. Los resultados del estudio mostraron que el biocarbón obtenido mediante la pirólisis lenta de tallos de bambú tiene una capacidad adsorbente del 87 %. Lo que hace de este un material prometedor para la purificación de agua de lluvia.

En particular, el artículo de López et al. (2022) destaca los siguientes resultados de la investigación sobre el uso del biocarbón:

- El biocarbón puede aumentar la porosidad del suelo hasta un 50%. Esto permite que el agua y el aire circulen más fácilmente, lo que puede mejorar la salud de las plantas y reducir la erosión del suelo.
- El biocarbón puede aumentar la capacidad de retención de agua del suelo hasta un 20%. Esto puede ayudar a reducir la sequía y mejorar la productividad de los cultivos.
- El biocarbón puede aumentar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Esto puede mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir la necesidad de fertilizantes.
- El biocarbón puede reducir la contaminación del suelo, capturando metales pesados y otros contaminantes.

Palma, (2016) Otro estudio realizado en el país señala el efecto del biocarbón obtenido de Pino Caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) sobre propiedades microbiológicas y químicas de un suelo. Los resultados del estudio muestran que el biocarbón tuvo un efecto positivo, ya que mejoró la fertilidad, aumentando los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo.

CAPÍTULO III

Metodología

Ubicación del área de estudio.

La unidad de estudio se ubica en la empresa Desarrollos Forestales San Carlos (DEFORSA) situada en el sector El Totumo, Km 12, en los municipios Ezequiel Zamora (anteriormente municipio San Carlos), Rómulo Gallegos y Tinaco del estado Cojedes, Venezuela. Se delimita por los puntos extremos de coordenadas UTM: 557645,292 E - 1062331,36 N, 548646,213 E - 1052049,517 N, 562835,551 E - 1056035,951 N y 545528,11 E - 1053312,546 N, con una superficie total de 10742 ha. El ensayo fue establecido en la parcela 18 de lote 1 la ubicación se aprecia en la figura 1.

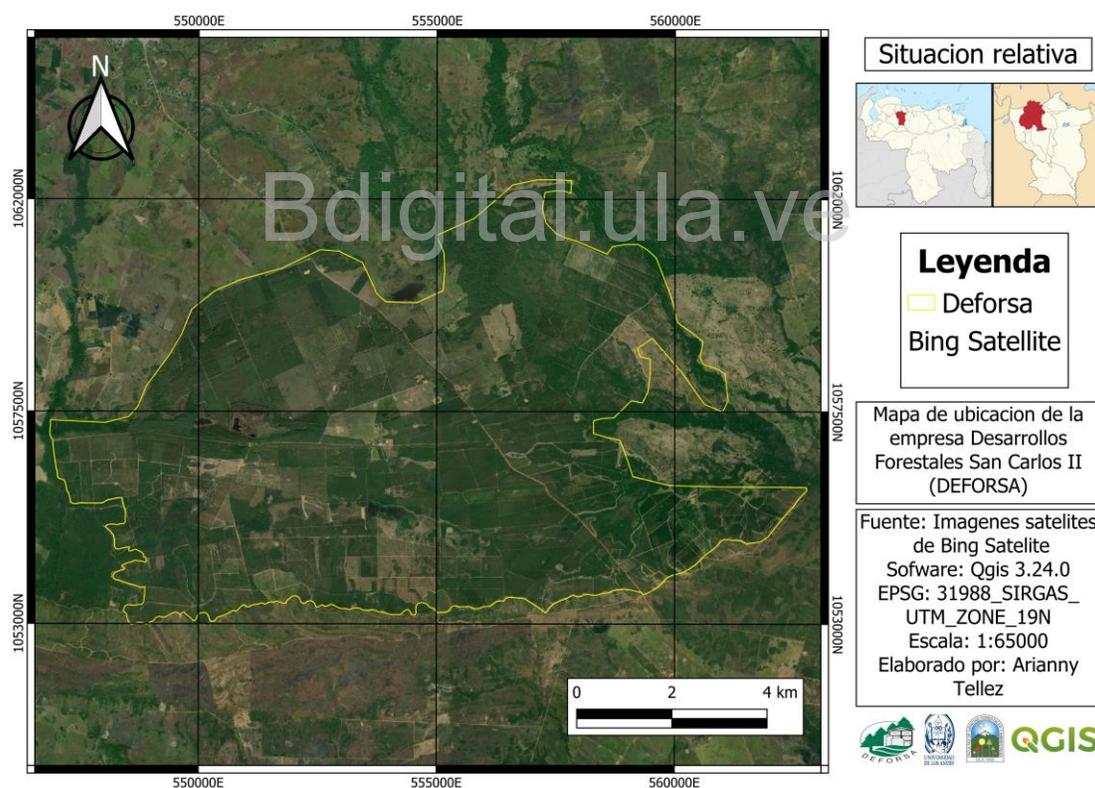


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Elaboración propia

Materiales y equipos

- Materia prima: carbonilla o ripio, excretas de búfalos, residuos orgánicos de alimentos (cascaras de frutas y vegetales) y suelo, 180 plantas de *Corymbia* clon CTL 6745.
- Materiales de campo: sacos de 40 kg, porrones, palas, tamiz, balanza, tijeras, bolsas plásticas, tirro, guantes de protección, mascarilla de gases, fósforos, libreta de apuntes, cámara, hidrogel, tubetes, placas de identificación, cinta métrica, vernier.
- Equipos: Termómetro marca: EXTECH, modelo Easy View 11 A.
Xilohigrómetro, marca Protimer, modelo Timbermaster BLD5601.
- Horno de ladrillo tipo brasileiro.

Metodología.

La investigación se desarrolla en las siguientes etapas: descripción del proceso de carbonización, activación biológica del biocarbón, aplicación del biocarbón, evaluación del cultivo indicador y el análisis estadístico.

Descripción del proceso de carbonización en horno tipo colmena brasileño.

Diseño del horno tipo colmena brasileño.

El horno tipo colmena brasileño, es uno de los métodos más comunes para la fabricación de carbón vegetal. Es un diseño simple y eficiente que se puede construir con materiales relativamente económicos. Las paredes del horno están hechas de ladrillos cocidos, que proporcionan un buen aislamiento térmico. El techo del horno está formado por una cúpula semiesférica, que ayuda a distribuir el calor de manera uniforme (FAO, 1983).

Este tipo de hornos es ideal para la producción de carbón, debido a que logra la carbonización por medio de una combustión interna producida por la quema controlada de la madera. Lo más importante de los hornos de ladrillo tipo brasileño es que permiten el control de entradas de flujos de aire, cuenta con una o más chimeneas que hace más eficiente la carbonización y el proceso de quema, aumentando significativamente la calidad

y el rendimiento de conversión de madera a carbón (Turcio, 2016). En la Figura 2 se muestra una representación del horno tipo brasileño,

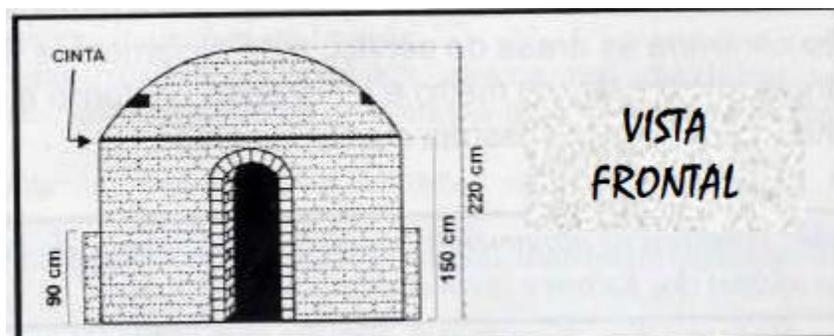


Figura 2. Vista frontal del horno tipo colmena brasileño.

Fuente. FAO, (1993).

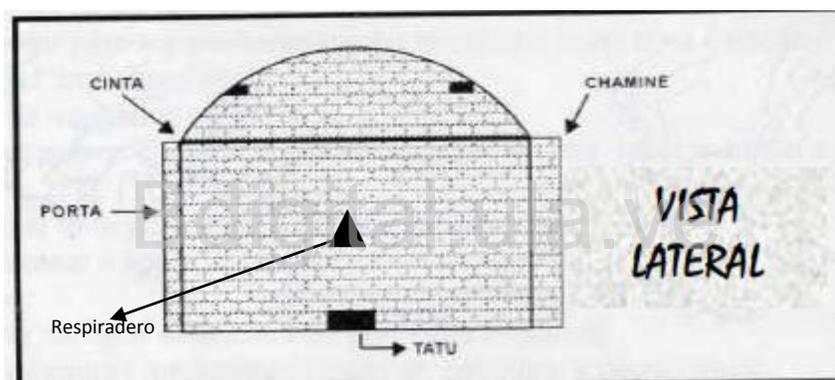


Figura 3. Vista lateral del horno tipo brasileño

Fuente: FAO, (1993).

Proceso de carbonización del material utilizado.

- 1) **Material a carbonizar:** el corte de la madera es la primera actividad realizada, consiste en aprear los árboles, despuntarlos y clasificarlos según los diferentes diámetros. La figura 4, muestra el apilado de madera de *Corymbia*.



Figura 4. Madera de *Corymbia* apilada destinada para carbón.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Datos de la madera utilizada para la carbonización.

Datos del producto			
Código	MDMA10	Descripción	Residuo de cosecha para carbón
Parcela	13	Lote	3
Año de siembra	2018	Material genético	Corymbia
Cubicación m³	17,67		

Fuente: Elaboración propia.

- 2) **Acondicionamiento del material a pirolizar:** es importante que la madera que ha sido trasladada al sitio de carbonización sea apilada lo más cerca del horno, para facilitar su manejo y se deben tomar en cuenta factores como humedad, peso, tamaño y forma. Se recomienda dejar secar el material leñoso cinco o seis semanas antes de su carbonización para hacer más eficiente el proceso. Para conocer el contenido de humedad se utilizó un Xilohigrómetro, marca Protimer, modelo Timbermaster BLD5601, figura 5.



Figura 5. *Medición del contenido de humedad de la madera*

Fuente: Elaboración propia

- 3) **Determinación de volumen:** el volumen se determina luego de cargar la madera en el vehículo de transporte, el cálculo se efectúa empleando la siguiente expresión: $V = (L * A * H) * 0,71$. Básicamente consiste en medir el largo (L), ancho (A) y altura (H) de la ruma para multiplicarla por el factor de corrección por estéreo y se obtienen los metros cúbicos, figura 6.



Figura 6. *Camión con la madera cubicada para ser transportada.*

Fuente: Elaboración propia.

- 4) **Carga del horno:** la madera se coloca en el horno de forma horizontal o vertical, procurando un apilamiento compacto. En este tipo de hornos, la madera se ingresa primero en forma vertical, empezando por la cúpula y luego relleno los espacios, como se muestra en la figura 7. Es importante que para una carbonización más eficiente, seleccionar madera seca y de buena calidad.



Figura 7. Arreglo de madera dentro del horno tipo colmena brasileño

Fuente: Elaboración propia.

- 5) **Cierre de la puerta de carga del horno:** tras cargar completamente el horno, se sellan las puertas con ladrillos y una mezcla ligera de agua y arcilla. Se dejan dos aberturas, una en la base para en encendido y otra a mitad de la puerta para el control de aire y que comience la carbonización, representado en la figura 8.

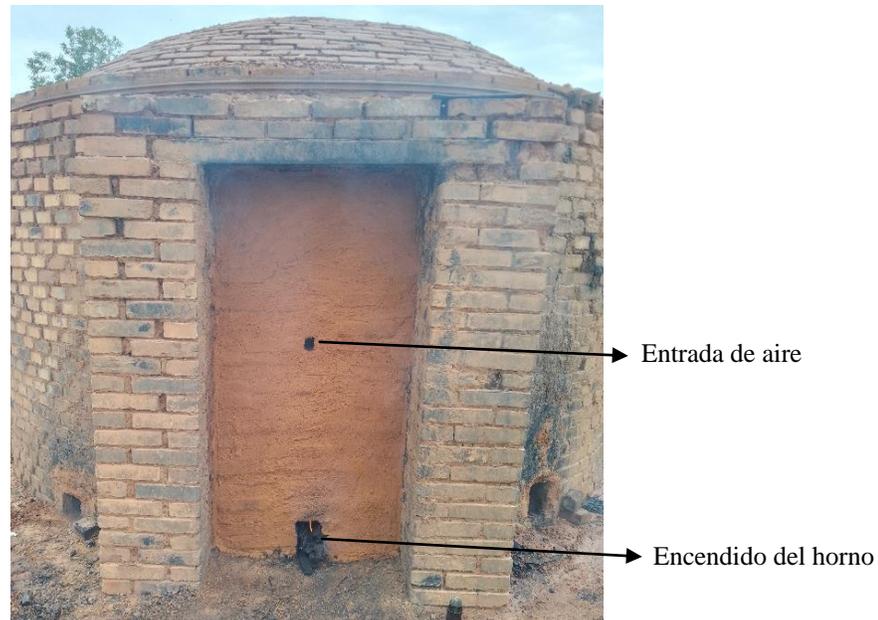


Figura 8 *Entrada sellada y abertura de encendido del horno tipo colmena.*

Fuente: Elaboración propia.

- 6) **Encendido del horno:** para encender el horno es necesario introducir ramas finas, hojas secas o papel en la parte de la puerta. Se deben dejar las aberturas o bocas de encendido y chimeneas despejadas para la entrada de aire al comienzo de la quema. Se colocan brasas para que la leña tome fuego, que debería suceder inmediatamente, al salir humo blanco y espeso indica que el proceso de combustión ha iniciado. Figura 8.

- Después de cerrar la abertura de ignición, el humo comenzará a salir por los respiraderos, inicialmente el humo es blanquecino, atenuándose al cabo de un cierto tiempo. Cuando el humo cambia a un tono azul o gris azulado, es una señal que la zona de carbonización se está ampliando y se debe comenzar a cerrar las aperturas de seguridad.
- Cuando se han cerrado las "bainas" o también llamadas aperturas de seguridad, se deja abiertos solamente los "tatus" o respiraderos de base.
- De este momento en adelante el proceso de carbonización se controla por los respiraderos de base.
- El humo de la(s) chimenea(s) no debería salir de forma rápida. Si se da el caso es aconsejable colocar un ladrillo en la entrada de aire, es decir en los

respiraderos de base para ralentizar la velocidad de carbonización y hacerla más efectiva.

- El fogonero se guía por el color del humo; cuando el humo es blanco, gris-blanco significa que el proceso está desarrollándose; una vez que el humo de la chimenea comienza a ponerse azul o gris azulado, deben cerrarse los respiraderos de base a cada lado de la chimenea.

7) **Control de temperatura:** durante todo el proceso de carbonización se realiza un monitoreo de la temperatura en dos puntos del horno, las lecturas se hicieron con un Termómetro marca: EXTECH, modelo Easy View 11 A, en horas específicas del día: 6am, 12pm, 6 pm y 12pm figura 9.



Figura 9. Control de temperatura por abertura en la puerta del horno.

Fuente: Elaboración propia.

- 8) **Apagado del horno:** Es importante destacar que la carbonización no se produce de manera uniforme en todo el horno. Cada respiradero requiere un control individualizado, tapándose de forma gradual según la evolución del proceso.
- La etapa final se caracteriza por un cambio en el humo de la chimenea, tornándose "transparente". Para confirmar que la carbonización se ha completado, se realiza un sondeo con una cabilla a través de los "tatus"

(orificios de control) a lo largo del horno. Si la madera ha sido completamente carbonizada, la cabilla no encontrará resistencia.

- Una vez confirmada la carbonización total del material, se procede a tapar todas las entradas de aire utilizando ladrillos y una mezcla de agua y arcilla. Este sellado hermético sofoca el horno, apagando el fuego y permitiendo que el proceso de enfriamiento comience.
- Es crucial permitir que el horno se enfríe de forma gradual. Un enfriamiento rápido puede afectar la calidad del carbón. Este proceso puede durar varios días, dependiendo del tamaño del horno y las condiciones ambientales.

9) Enfriamiento del horno: para bajar la temperatura y asegurarse que no exista una grieta u orificio que pueda resultar en una entrada de aire se aplica una mezcla de barro diluido en las paredes del horno.

10) Apertura del horno: La temperatura ideal para abrir el horno y comenzar la descarga es de 60°C (140°F). Sin embargo, en la práctica, el técnico es quien determina el momento adecuado basado en la experiencia y el tacto. Abrir un horno antes de que se haya enfriado lo suficiente es un error grave. Si no se cumple esta norma, existe un alto riesgo de que el carbón vegetal se incendie. Si se intentara apagar el fuego con agua, el resultado sería carbonilla en polvo, figura 10.



Figura 10. *Apertura del horno y descarga del carbón.*

Fuente: Elaboración propia.

11) Descarga: La seguridad es la principal prioridad durante la descarga del horno, por tal motivo es indispensable contar con abundante agua cerca de la entrada, esto permite actuar con rapidez en caso de emergencia, utilizando una extensión de caños de agua, un tambor de agua, o cualquier otro método efectivo.

12) Pesaje del carbón: para medir los metros cúbicos de carbón se utiliza en este caso una caja de madera con maya de un metro cúbico, figura 11.



Figura 11. *Medición del carbón en un contenedor de un metro cúbico.*

Activación del biocarbón

Para la activación de la carbonilla o ripio procedente del empacado del material que se carbonizó, se usaron bioactivadores como suelo, excretas de búfalas y materia orgánica (cascaras de frutas y verduras).

- Suelo: Contiene una gran diversidad de microorganismos beneficiosos que pueden mejorar la fertilidad de las plantas.
- Excretas de búfalas: Aportan nutrientes y materia orgánica al biocarbón, mejorando su capacidad de retención de agua y su porosidad.

- **Materia orgánica (cáscaras de frutas y verduras):** Es una fuente de carbono y energía para los microorganismos que colonizan el biocarbón, aumentando su actividad biológica (Iglesias, 2018).
- 1) Finalizada la carbonización, se selecciona como material de partida, el ripio o carbonilla proveniente de la empacadora de carbón. Esta carbonilla se trituró manualmente y fue tamizada con una criba de 5 mm de diámetro aproximadamente.
 - 2) Para determinar la cantidad de biocarbón a elaborar por tratamiento se realizó en base a un volumen definido, para ello se empleó un contenedor de 18 litros y un porrón con un volumen de 54 litros. Basándose en estudios previos, se realizó una estimación inicial de la cantidad de biocarbón a obtener por tratamiento. Esta estimación se utilizó como punto de partida para la planificación y el dimensionamiento del proceso (Major, 2010), Tabla 4.

Tabla 4.

Porcentaje de los tratamientos y el peso en Kg.

	Descripción de los tratamientos	Peso kg
T1	Testigo	X
T2	50% carbón (C) – 50% suelo (S)	87
T3	50% carbón (C) – 50% materia orgánica (cáscaras de frutas y verduras) (M.O)	65,5
T4	50% carbón (C) – 50% estiércol de búfala (E.B)	65,4
T5	50% Carbón - 25% M.O- 25% E.B	71,9
T6	25% (C) – 25% (S) - 25% (M.O) – 25% (E.B)	93,4

Fuente: Elaboración propia

- 3) Cada uno de los tratamiento se dejará por un lapso de 15 días para una apropiada activación, tal como señala (GROW DEPO, 2020). Empresa dedicada a la fabricación y comercialización de biocarbón.

- 4) Luego de la fase de activación del biocarbón, se realiza una mezcla homogénea de cada tratamiento antes de su aplicación al suelo. Es una práctica fundamental para asegurar una distribución uniforme y optimizar sus efectos.
- 5) Aplicación del biocarbón en el suelo:
 - Se procede a hacer hoyos de 40 cm de profundidad para cada planta.
 - Los tratamientos se aplican de forma manual, depositando aproximadamente 1 kg por planta en el fondo de cada hoyo. La cantidad de biocarbón puede variar según el tipo de suelo, las características de las plantas y los objetivos del estudio.
- 6) Se adicionó hidrogel al suelo junto con el biocarbón. Esta práctica mejora la retención de humedad, un factor crucial para el crecimiento de las plantas en condiciones de escasez de agua.
- 7) Posteriormente de ser aplicado el biocarbón, se procede a la siembra de las plantas, la evaluación de su crecimiento y desarrollo se llevará a cabo durante un período de 3 meses.
- 8) Los protocolos de riego,
 - se realiza un control de riego dos veces por semana. Esta frecuencia es necesaria para asegurar la humedad adecuada del suelo durante la fase inicial de crecimiento de las plantas, cuando son más sensibles al estrés hídrico.
 - A partir del segundo y tercer mes se reduce la frecuencia de riego a una vez por semana. Las plantas ya han establecido un sistema radicular más fuerte y son más tolerantes a la sequía.

Diseño experimental

El diseño experimental establecido fue un arreglo completamente al azar de 5 tratamientos más el testigo, en un ensayo por triplicado de 10 plantas por unidad. Es decir, 30 plantas por tratamiento 180 en total. El distanciamiento en plantación es de 4,5 m entre hilos x 2,67 m entre plantas, es decir 833 plantas por hectárea. Estos tratamientos se comparan y las combinaciones se presentan en la tabla 4.

Registro de datos

La evaluación del cultivo indicador consiste en medir los atributos morfológicos con respecto a altura (cm), diámetro (mm) y la sobrevivencia de las plantas de *Corymbia* en un ensayo en plantación.

El registro de datos se realizó al día siguiente de la aplicación de los tratamientos. Esta primera evaluación es crucial para establecer las condiciones iniciales del ensayo y obtener una referencia para las siguientes mediciones. Los datos posteriores se tomaron a los 30, 60 y 90 días después de haber comenzado el ensayo. Estos intervalos de tiempo permiten capturar la evolución de las variables de interés (altura y diámetro) a lo largo del estudio y observar cómo los diferentes tratamientos actúan en el crecimiento de las plantas.

- **Medición altura de las plantas:** se mide en centímetro utilizando una cinta métrica, la medida se realiza desde la base de la planta paralela al suelo hasta el ápice de la misma se toman los datos en cm.
- **Medición del Diámetro de las Plantas:** se utiliza un vernier para obtener datos precisos del diámetro en milímetros, es una herramienta ideal para este tipo de mediciones debido a su precisión y facilidad de uso. Los controles se realizaron a una distancia de 8 cm por encima del suelo, esta altura se seleccionó para obtener un valor representativo del diámetro del tallo principal de la planta, evitando la influencia de la zona basal y las ramificaciones.

Procesamiento estadístico

El trabajo corresponde a un ensayo con observaciones después de aplicar el biocarbón para cada tratamiento. Los valores obtenidos se sometieron a un análisis estadístico descriptivo (media, desviación estándar) y la aplicación de un modelo de ANOVA de una vía completamente aleatorizado con mediciones repetidas en el tiempo y con un análisis a posteriori aplicando la prueba Tukey de comparación de medias, con el fin de determinar las diferencias estadísticamente significativas del incremento de la altura y diámetro entre los 5 tratamientos y el testigo. Los valores se tabularon en una hoja de cálculo para introducirlos en una Calculadora ANOVA unidireccional.

Croquis, tratamientos dispuestos en campo.

Ensayo de Biocarbón							
Ubicación		Material Genético		Detalles		Responsables	
Lote	I	Clon	9988	Número de Plantas por Tratamientos	10	Autora	Arianny Tellez
Parcela	18	Cód.	CTL 6745	Número de Plantas por Bloques	60	Supervisor	Vismar Parra
				Número de Tratamientos por Bloques	6		

Área de Reserva

Bdigital.vialidad.ve

Hilos de borde (5)

Parcela 18 A	Vialidad	Hilos de borde (2)							
			B1A	T3	T2	T1	T4	T6	T5
			B2A	T2	T5	T3	T6	T4	T1
			B3A	T1	T3	T4	T6	T5	T2

Figura 12. *Croquis, tratamientos dispuestos en campo.*

CAPÍTULO IV

Discusión de resultados

Rendimiento del carbón

Para el llenado del horno se utilizaron 14,63m³ de madera que presentó un contenido de humedad de 21% se obtuvieron 1746,18 Kg equivalentes a 9,61 m³ aproximadamente. En relación a esto, el rendimiento del presente estudio es cercano al reportado por Bustamante et al. (2013), con 9.2 m³ de carbón en un horno tipo colmena brasileño.

Evaluar los efectos del biocarbón sobre las características morfológicas y la sobrevivencia de las plantas.

Los rasgos morfológicos (altura y diámetro de la planta) pueden correlacionarse con la supervivencia y el crecimiento inicial, teniendo en cuenta que generalmente cuanto más grande es la planta, mayor es su potencial de sobrevivencia (Gonzales et al, 2020). Los atributos morfológicos y fisiológicos se traducen a la capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y edáficas del sitio, tabla 5.

Tabla 5.

Tratamientos y número de plantas sobrevivientes en las primeras fases de su establecimiento.

Tratamientos	Platas	perdidas
TEST.	23	7
T2	25	5
T3	22	8
T4	26	4
T5	27	3
T6	25	5
TOTAL	148	32

Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo de plantación, 148 de las 180 plantas sembradas sobrevivieron, lo que representa una tasa de supervivencia del 82,2%. La mortalidad se concentró principalmente en el primer mes del ensayo, con un total de 32 plantas que no sobrevivieron. El tratamiento T3 y el testigo fueron los que más plantas perdieron, con un total de 15, mientras que el tratamiento 5 solo presentó 3 plantas. Es importante mencionar que las plantas fueron dispuestas en campo a inicios de la temporada seca esto representa un estrés importante en la adaptación de los individuos al medio y a las condiciones de la temporada de sequía, la figura 13 representa las mortalidad de las plantas durante el ensayo realizado.

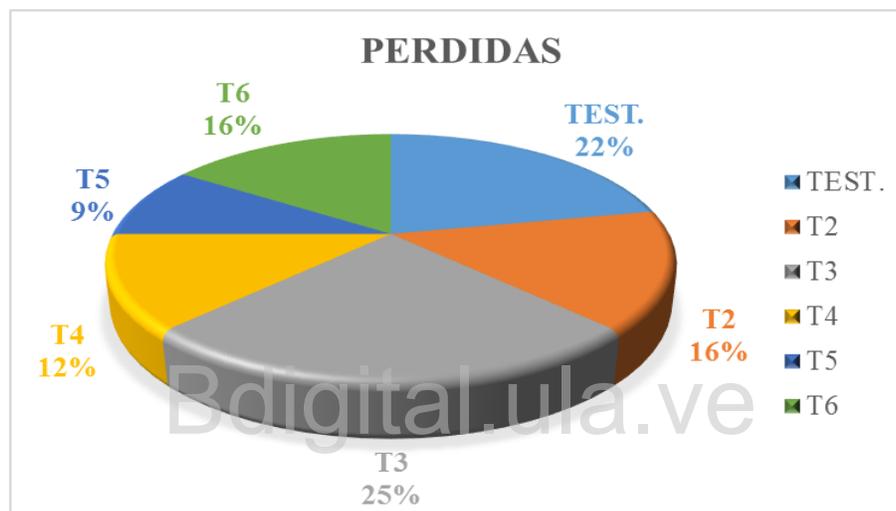


Figura 13. *Perdidas de las plantas en el ensayo por afectaciones externas.*

Fuente: Elaboración propia.

- La mortalidad de las plantas varió entre los diferentes tratamientos ensayados.
- El tratamiento 5 fue el que menos mortalidad de plantas presentó durante el primer mes, el tratamiento que implicaba la aplicación al sustrato de 50% carbón, 25% materia orgánica y 25% estiércol de búfalas.
- El tratamiento T3 y el tratamiento control reportó el mayor número de plantas que no sobrevivieron y está representado en la figura 13 con 25% y 22%.

Durante el ensayo se observó la interferencia de factores externos en campo que indican que las plantas fueron afectadas principalmente por insectos de la familia formícidos (bachacos). Se observó también la presencia de material fecal de la familia de los lepóridos

(conejos), que sugiere que estos animales podrían haber contribuido a la mortalidad de las mismas.

Agentes externos:

- **Bachacos:** son insectos comedores de hojas que pueden causar defoliación y daños severos a las plantas. La defoliación reduce la capacidad fotosintética de las plantas, lo que puede afectar su crecimiento y desarrollo. En casos severos, la defoliación puede conducir a la muerte de las plantas, (CONAFOR, 2016).
- **Conejos:** son animales pueden causar daños a las plantas por ramoneo, es decir, por comer las hojas, brotes y cortezas. El ramoneo puede afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas, y en casos severos, puede conducir a la muerte de las plantas, sin embargo se estima que este no fue un factor crítico (CONAFOR, 2016).

Incremento de la altura de las plantas

En el diseño de investigación se aplicó el modelo ANOVA unidireccional de comparación del incremento en altura entre los tratamiento tabla 6.

Tabla 6.

Análisis de varianza para el incremento en altura de las plantas.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	valor p
Tratamientos	5	46,795.965	44,843	0,0008
Error (dentro de grupos)	141	294,282.945		
Total	146	34,107.891		

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el valor $p < \alpha$, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, es decir, la significancia presenta un valor 0,0008 indicando que los tratamientos tienen diferencias altamente significativas cuando se compara el incremento de altura de las plantas para los diferentes tratamientos evaluados, esto se observa en la tabla 6.

Tabla 7.*Estadísticas descriptivas del incremento de altura de las plantas.*

Estadísticos descriptivos			
Tratamientos	Media	Desviación típica	N
TEST.	27,05	12,76	23
T2	22,76	12,74	25
T3	23,68	13,00	22
T4	38,73	16,89	26
T5	28,93	15,61	27
T6	33,72	14,58	25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, Se aprecia el incremento en altura de las plantas, considerando el promedio, desviación típica y número de individuos por tratamiento. Los resultados indican que las plantas con mayor altura fueron aquellas sometidas al tratamiento T4 (50% carbón y 50% estiércol de búfalas). Esto se observa gráficamente en la figura 14. La altura promedio de T4 es significativamente superior a los demás tratamientos, como T2, que presenta un menor incremento en altura durante el ensayo.

Es importante mencionar que los valores de la desviación típica son elevados, lo que refleja la variación en altura observada entre las plantas de los diferentes tratamientos en campo. Esta variabilidad puede deberse a diversos factores, como diferencias en la calidad de las plántulas o la exposición a condiciones ambientales no uniformes o afectaciones por agentes externos.

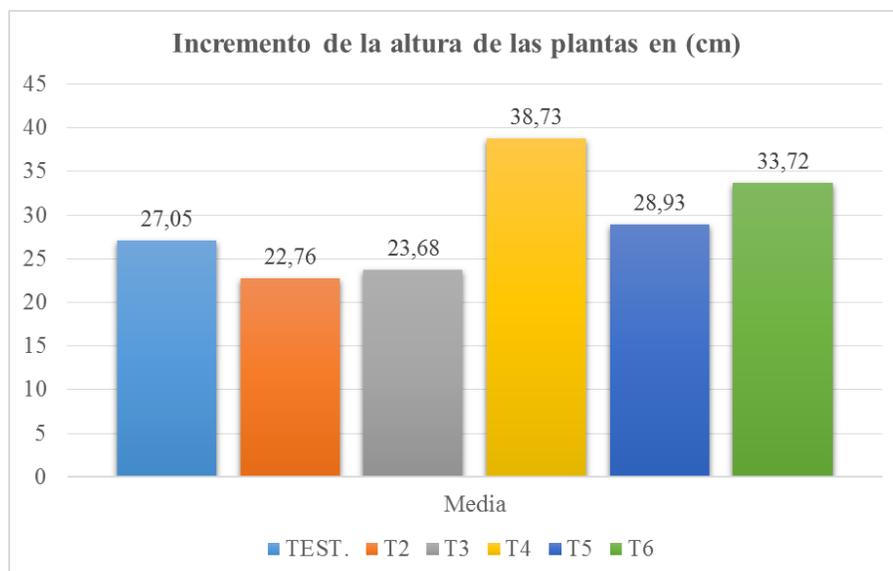


Figura 14. *Incremento en promedio de la altura de las plantas.*

Los promedios del incremento de la altura de las plantas varían entre los diferentes tratamientos como se aprecia en la Figura 13. El tratamiento que obtuvo mejores resultados fue en el que se aplicó 50% carbón y 50% estiércol de búfalas, es decir T4 con 38,73 cm seguido de T6 y T5 que en su composición presentan también excretas de búfalas.

El uso de estiércol como fertilizante para el suelo es una práctica agrícola habitual y antigua, que se remonta posiblemente a los inicios de la misma agricultura este material orgánico aporta una riqueza de nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno, el fósforo, el potasio, entre otros (Tortosa, 2019).

Los estiércoles de animales herbívoros son excelentes para el compostaje, se pueden usar solos o como estructuradores para otros residuos orgánicos. Ayudan a equilibrar la relación carbono-nitrógeno, aportan microorganismos, materia orgánica y mejoran la estructura física del compost. La proporción ideal es de un 50% de estiércol y 50% de material rico en carbono. El uso del estiércol en el compostaje resulta en un compost de alta calidad y beneficioso para las plantas (Tortosa, 2019).

Los estiércoles de animales herbívoros son excelentes para el compostaje, se pueden usar solos o como estructuradores para otros residuos orgánicos. Ayudan a equilibrar la relación carbono-nitrógeno, aportan microorganismos, materia orgánica y mejoran la

estructura física del compost. La proporción ideal tal como señala Tortosa (2019) es de un 50% de estiércol y 50% de material rico en carbono. El uso del estiércol en el compostaje resulta en un compost de alta calidad y beneficioso para las plantas. La comparación de las medias homogéneas para el incremento de altura de los diferentes tratamientos se observa en la figura 15.

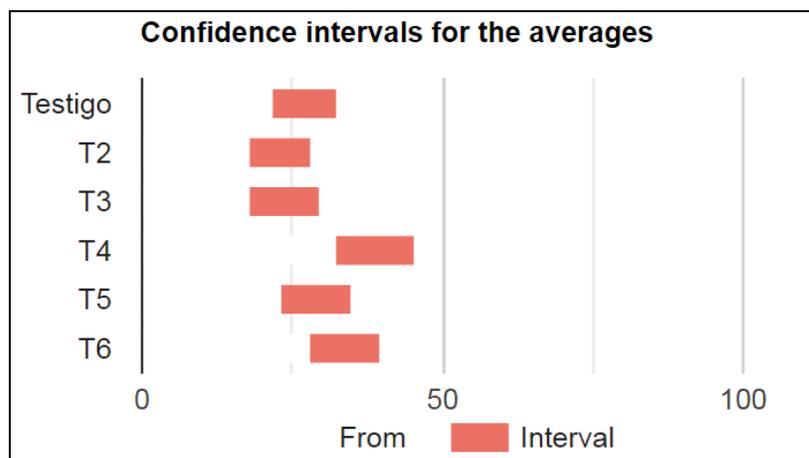


Figura 15. Prueba Tukey de comparación de medias para el incremento de altura de las plantas entre los diferentes tratamientos

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran en la figura 15 la comparación de medias de los grupos homogéneos, al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas por efecto de los tratamientos en el incremento de altura de las plantas. En la evaluación del comportamiento de los tratamientos se dividieron los datos en dos grupos iniciales, como se muestra en el gráfico se observó un solapamiento entre los tratamientos testigos, T2 y T3, siendo el tratamiento T4 el tratamiento que tiene mayor separación entre grupo indicando así, que se trata del tratamiento más efectivo en el incremento de las plantas del género *Corymbia*.

Incremento del diámetro de las plantas

En el diseño de investigación se aplicó el modelo ANOVA unidireccional completamente aleatorizado de comparación del incremento del diámetro de la plantas entre los diferentes tratamiento tabla 8.

Tabla 8.

Análisis de varianza para el incremento del diámetro de las plantas.

Origen	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	valor p
Tratamientos	5	1.104.204	58.063	0.00006
Error (dentro de grupos)	142	5.400.893		
Total	147	6.505.097		

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el valor $p < \alpha$, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, es decir, la significancia presenta un valor 0,00006 indicando que los tratamientos tienen diferencias altamente significativas cuando se compara el incremento del diámetro de las plantas para los diferentes tratamientos evaluados, esto se observa en la tabla 8.

Tabla 9.

Estadísticas descriptivas del incremento del diámetro de las plantas.

Estadísticos descriptivos			
Tratamientos	Media	Desviación típica	N
TEST.	3,60	1,94	23
T2	3,46	2,27	25
T3	3,26	1,92	22
T4	5,69	1,80	26
T5	4,41	1,92	27
T6	4,84	1,82	25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9 se presenta el promedio del diámetro, la desviación estándar y el número de plantas evaluadas para cada tratamiento. El diámetro promedio de los cinco tratamientos y el testigo varían significativamente, T4 presenta un valor promedio de 5,69 mm siendo el tratamiento más efectivo en comparación con T3 que su media es de 3,26 mm de incremento del diámetro a los 90 día haber iniciado la evaluación. Los diámetros promedios de los diferentes tratamientos se muestran en la figura 16.

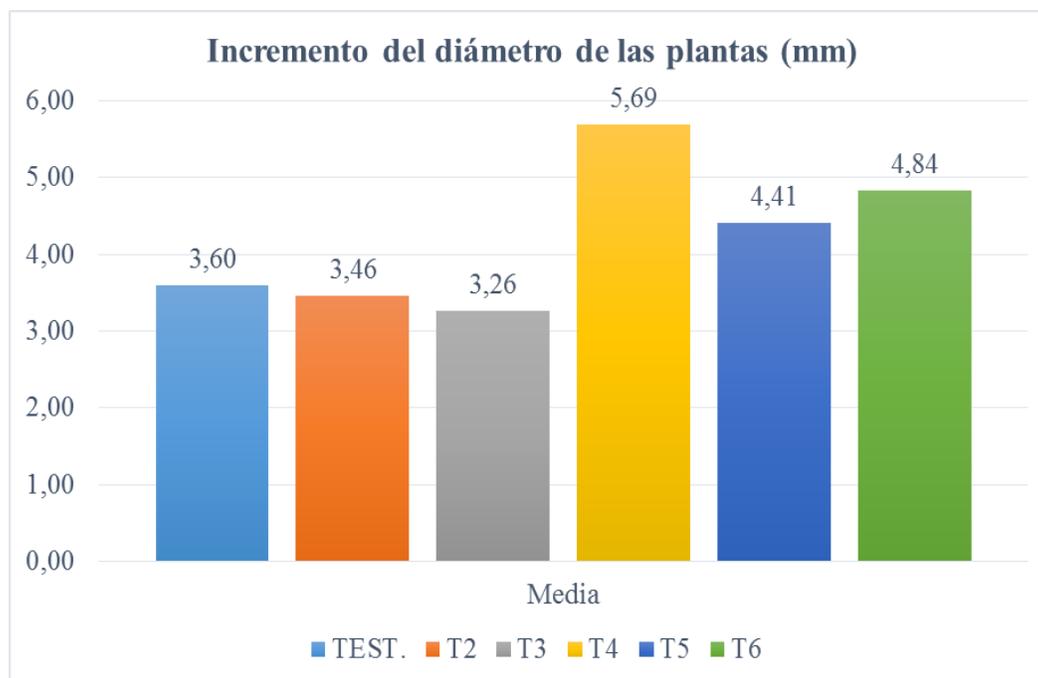


Figura 16. Promedios del incremento de los diámetros en mm de las plantas.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se observa el incremento del diámetro en milímetros para cada uno de los tratamientos evaluados, el T4, compuesto por una mezcla 50% estiércol de búfalas y 50% carbón, presenta un valor promedio de diámetro superior al de los demás tratamientos. El T3 compuesto por 50% carbón y 50% materia orgánica (cáscaras de frutas y vegetales) presenta el valor promedio menor de las plantas ensayadas.

Existen diferentes razones por las que el tratamiento T3, compuesto por un 50% de carbón y un 50% de materia orgánica (cáscaras de frutas y verduras), podría ser menos efectivo para el crecimiento de las plantas del género *Corymbia*, por ejemplo la materia orgánica, como las cáscaras de frutas y verduras, necesita tiempo para descomponerse y liberar los nutrientes que las plantas necesitan para crecer. El proceso de descomposición puede ser lento, especialmente en condiciones de baja humedad o temperatura (Román, Martínez y Pantoja, 2013)

Se carece de un criterio único, basado en los aspectos morfológicos, que explique la variación en los resultados después de la plantación; sin embargo, el diámetro ha sido

reconocido como un atributo inicial importante de las plantas], pues promueve la supervivencia y tolerancia a condiciones climáticas y biológicas adversas en campo, ya que su capacidad puede atribuirse, en parte, a la relación entre el diámetro inicial, el volumen de la raíz y las raíces primarias (Prieto, et al. 2018), y la comparación de la media de los diámetros evaluados se establece con la prueba Tukey que se ilustra en la figura 16.

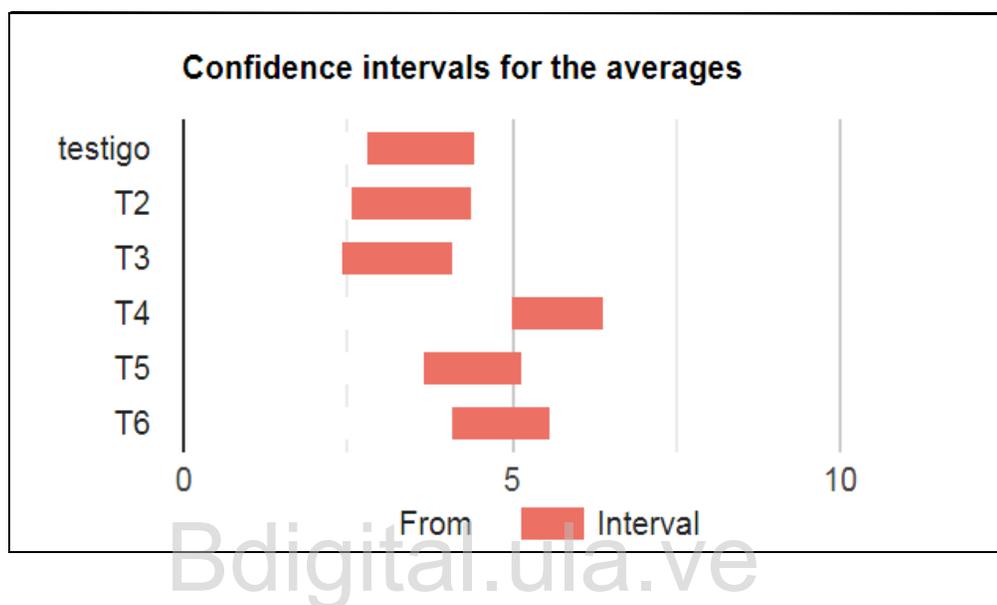


Figura 17. Prueba de Tukey del incremento del diámetro de las plantas

Fuente: Elaboración propia

La figura 17 muestra el promedio de los grupos subconjuntos homogéneos, calculadas a partir de las medias observadas, ponen de manifiesto diferencias significativas en el incremento del diámetro de las plantas a través del tiempo. Esto mediante la prueba estadística de Tukey, la cual demostró que el efecto de los tratamientos sobre el diámetro de las plantas es estadísticamente relevante.

La prueba de Tukey nos permite identificar grupos de tratamientos con comportamientos similares en cuanto al crecimiento de las plantas como es el caso T6 y T5 que aparece en ambos grupos. Por otro lado se observa que el tratamiento que presenta una separación marcada se trata del tratamiento T4 por lo que se le atribuye como el más favorable en comparación con el tratamiento testigo.

CAPÍTULO V

Conclusión

En este estudio se evidencia que la elección del tratamiento adecuado puede tener un impacto significativo en el crecimiento de las plantas del género de las *Corymbia*. La información obtenida puede ser utilizada para optimizar las prácticas de manejo y mejorar el rendimiento de estos cultivos.

La aplicación de biocarbón elaborado a partir de la combinación de carbón y estiércol de búfala ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar el crecimiento de las plantas. Esta mejora se debe a la sinergia entre ambos materiales, que crea un biocarbón con una estructura porosa y rica en nutrientes, ideal para el crecimiento de las plantas.

El tratamiento T4 se posiciona como una alternativa efectiva para impulsar el crecimiento en altura de las plantas de un período de 90 días en comparación al tratamiento testigo. Se resalta el potencial de esta combinación de biocarbón y estiércol de búfalo para optimizar el desarrollo de estas plantas.

Bdigital.ula.ve

Recomendaciones

- Se debe evaluar la factibilidad económica de implementar biocarbón en el proceso de fertilización de plantas de *Corymbia* en plantaciones forestales.
- Realizar análisis antes y después de la aplicación del biocarbón para evaluar cambios en parámetros como pH, conductividad eléctrica, contenido de nutrientes, materia orgánica y actividad microbiana.
- Es importante realizar un seguimiento del crecimiento de las plantas en el tiempo para evaluar el impacto a largo plazo de los diferentes tratamientos en su desarrollo y rendimiento.
- Repetir el ensayo en condiciones de lluvia para evaluar la respuesta de las plantas al biocarbón en diferentes escenarios climáticos.
- Probar diferentes dosis de biocarbón para determinar la tasa óptima de aplicación que maximice el crecimiento de las plantas y la rentabilidad económica.
- Se sugiere ampliar la muestra de ensayo.
- Evaluar los impactos ambientales a largo plazo del uso de biocarbón en plantaciones forestales.
- Respecto al material biológico utilizado para la activación del biocarbón se deben tener en cuenta si pueden estos causar afectación a las plantas.

Referencias Bibliográficas

- Agarwal H, Kashyap VH, Mishra A et al (2022) Fertilizantes a base de biocarbón y sus aplicaciones en la promoción y protección del crecimiento de las plantas. *3 Biotecnología* 12:136. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03195-2>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M. Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99: 19–33. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24289982/>.
- Amalina, F., Syukor Abd Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Advanced techniques in the production of biochar from lignocellulosic biomass and environmental applications. *Cleaner Materials*, 6 (100137), 100137. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100137>
- Aponte, G., & Rodríguez, B. (2021). Tendencias en el uso del biocarbón como acondicionador de suelos. *Revista De Química*, 35(2), 44-51. Recuperado a partir de: <https://shorturl.at/8gOfi>.
- Araujo, J. (2024). Abono Bocashi. Entrevista realizada al Prof. Jesús Araujo. Universidad de Los Andes. Facultad de Cs. Forestales y Ambientales. Escuela de Ingeniería Forestal.
- Bastidas I., Miño, P. (2019). Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomasas, tesis pre. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, R. G. Ramírez-Lozano, J. J. Corral-Rivas and F. Garza-Ocañas. 2013. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. *Industrial Crops and Products* 42: 169-174.
- CONAFOR, (2010). Paquete Tecnológico Manual de construcción y manejo de hornos de ladrillo para fabricar carbón. [Www.Uv.Mx](http://www.Uv.Mx). Retrieved January 16, 2024, from https://www.uv.mx/apps/agronomia/dendro_2011/Inicio_files/manualhornos.pdf

- CONAFOR, (2016). Manual para la identificación y manejo de plagas en plantaciones forestales. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=777>
- CONAFOR, (2023). El carbón vegetal: proceso de producción, calidad y rendimiento. <https://acortar.link/yfPWt4>.
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana: organo científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C*, 34(3), 367–382. <https://acortar.link/2VTZEK>.
- Espinosa, K. (2011). Elaboración de un abono orgánico a base de desechos del procesamiento del brócoli (*brassica oleracea itálica*), para disminuir la dependencia de productos químicos artificiales. Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. <https://acortar.link/XHH9Ej>.
- Esteves, B., Torres, S., Maldonado, F., Madeira, L. (2020). Fitting biochars and activated carbons from residues of the olive oil industry as supports of fe-catalysts for the heterogeneous fenton-like treatment of simulated olive mill wastewater *Nanomaterials*, 10 (5) (2020), 10.3390/nano10050876
- Figueroa, A. (2019). Desarrollo de un biocarbón funcionalizado a partir de dos residuos industriale. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo.
- Flores, F., R. E. y Quinteros, S. 2008. Diseño de horno tipo retorta para elaborar carbón vegetal. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Ingeniería. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, C.A.
- FAO, 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Roma. <https://www.fao.org/3/X5328S/X5328S00.htm>
- García, R. (2021). Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo. *Técnica Industrial*, 1 (328), 44-53. <https://www.tecnicaindustrial.es/wpcontent/uploads/Numeros/118/7613/a7613.pdf>

- Gonzales, J., Lopez, R. y Gutiérrez. (2020). Efectos del Biochar sobre el crecimiento y sobrevivencia de seis especies forestales con potencial uso para la restauración de suelos degradados. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Tomado: <https://acortar.link/M9Gor8>
- Grow Depot México. (2020). Grow Depot mx. <https://growdepotmexico.com/>
- Guel-Najar, N., Hurtado1, J., Espadas A., Guevara, J., Lara, F. (2023). Biocarbon: una revisión de literatura sobre sus propiedades, métodos de caracterización y aplicaciones. Universidad Autónoma de Coahuila. Recuperado de: <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc75/370.-%20biocarbon.pdf>
- Hans, P. (2012). Biochar - a key technology for the planet. *Ithaka Journal*. 1, (2012), 75-79.
- Hossain MZ, Bahar MM, Sarkar B et al (2020) El biocarbón y su importancia en la dinámica de los nutrientes en el suelo y las plantas. *Biocarbón* 2:379–420. <https://acortar.link/Kep4Uc>.
- IBI Biochar Standards, (2019)—Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil, v.2.1. Available online: <https://acortar.link/xbGmZm>.
- Iglesias, S. (2018). Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de Eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Khan, S.; Waqas, M.; Ding, F.; Shamshad, I.; Peter, H.; Arp, H.; Li, G. (2015). The influence of various biochars on the bioaccessibility and bioaccumulation of PAHs and potentially toxic elements to turnips (*Brassica rapa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 300: 243-253. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26188867/>
- Khan M, Ullah Z, Naqvi SR et al (2022) Redes neuronales artificiales para la predicción del rendimiento de biocarbón: un estudio comparativo de algoritmos metaheurísticos. *SSRN Electrón J*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4047675>

- Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Roy, A., Chakraborty, S., Vithanage, M., & Biswas, J. K. (2023). Multifaceted applications of biochar in environmental management: a bibliometric profile. *Biochar*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00207-z>
- Kumar A, y Bhattacharya T (2021) Biochar: una solución sostenible. *Environ Dev Sustain* 23:6642–6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>
- Kumar, M., Dutta, S., You, S., Luo, G., Zhang, S., Show, P. L., Sawarkar, A. D., Singh, L., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. *Journal of Cleaner Production*, 305(127143), 127143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127143>.
- Lakshmi D, Akhil D, Kartik A et al (2021) Aplicaciones de inteligencia artificial (IA) en la adsorción de metales pesados utilizando biocarbón modificado. *Ciencia ambiente total* 801:149623. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149623>
- Lehmann, J. & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan, United Kingdom: Dunsten house. Recuperado de <https://biochar-international.org/book/>
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, 763: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 312(123614), 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- López, J y Vera, C. (2018). Crecimiento y rectitud del fuste de orígenes geográficos de *Corymbia* spp. En la mesopotamia argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 44, núm. 3, págs. 309-315 <https://www.redalyc.org/journal/864/86458368003/html/>

- López, L., Vega, L., Rendón, C y Tobón, S. (2019). Aprovechamiento de residuos madereros: cuantificación, caracterización y valorización 1.^a edición. Corporación Universitaria Remington, Medellín, Colombia. Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena) <https://acortar.link/oi9MZe>.
- López, M., Soledad, E., Aponte, M., & Delgado, J. (2022). Estudio de la capacidad adsorbente del biocarbón obtenido mediante tecnologías apropiadas como medio para purificar agua de lluvia: Study of the absorbent capacity of biochar obtained through appropriate technologies as a means of purifying rainwater. *Tekhné*, 24(2), 13. <https://acortar.link/ClnGnz>.
- Major, J. 2010. Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems. International Biochar Initiative. www.biochar-international.org.
- Nath H, Sarkar B, Mitra S, Bhaladhare S (2022) Biocarbón a partir de biomasa: una revisión sobre la preparación de biocarbón, su modificación y su impacto en el suelo, incluida la microbiología del suelo. *Geomicrobiol J* 39:373–388. <https://acortar.link/wH0i2t>.
- Palma, Z. (2016). Efecto del biochar obtenido de Pino Caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) sobre propiedades microbiológicas y químicas de un suelo de la Mesa de Guanipa, estado Anzoátegui. Universidad Central de Venezuela. <https://acortar.link/XfgxGO>.
- Pan, X., Gu, Z., Chen, W., & Li, Q. (2021). Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review. In *Science of the Total Environment*, 754: 1–17. Elsevier B.V. <https://acortar.link/AYUKI9>.
- Qin F, Li J, Zhang C et al (2022) Biochar en el siglo XXI: una visualización de colaboración, identificación de fronteras y tendencias futuras basada en datos. *Ciencia ambiente total* 818:151774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151774>
- Reyes, G. (2018). Aprovechamiento de residuos forestales en forma de biocarbón como alternativa agroecológica para la producción de madera de calidad de *Acacia mangium* Willd. Universidad Nacional de Colombia. <https://acortar.link/dR97Wb>.

- Rodriguez, I. (2013). Tesis de doctorado. Reciclado en suelos de lodos de refinería: nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas. España.
- Román Martínez y Pantoja, (2013). Manual de compostaje del agricultor. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile. Tomado de: <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>
- Segura, D. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta. Tecnológico de Costa Rica Ingeniería Ambiental. <https://acortar.link/9WGfK2>
- Singh H, Northup BK, Rice CW, Prasad PVV. (2022a) Las aplicaciones de biocarbón influyen en las propiedades físicas y químicas del suelo, la diversidad microbiana y la productividad de los cultivos: un metanálisis. *Biocarbón* 4:8. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>
- Shaikh WA, Kumar A, Chakraborty. (2022b) Nanocompuesto a base de biocarbón procedente de residuos de hojas de té para la eliminación de tintes tóxicos: desde la fabricación fácil hasta la aptitud funcional. *Quimiosfera* 291:132788. <https://acortar.link/XiO6m7>.
- Soil Survey Laboratory (SSL). (1995). Information manual. Soil Survey Investigations Report N° 45. Version 1.0. USDA. Lincoln. 305 p.
- The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems At Breaking Point (SOLAW 2021). (2021). En FAO eBooks. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- The European Biochar Certificate (EBC). (2020). European-biochar.org. Recuperado el 4 de octubre de 2023, de <https://www.european-biochar.org/en>.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19 (1) (2020), 191-215. <https://acortar.link/TTgmCV>.
- Tortosa, G. (2019). Materiales para compostar: estiércol de vaca. *Compostando Ciencia*. Tomado de: <https://acortar.link/WD5E8F>.

- Turcios, H. (2016). Diseño de la planta de producción del carbón vegetal de encino (*quercus* sp.) para la finca el apazote, ubicada en Santa Cruz El Chol, baja Verapaz. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Agronomía. <https://acortar.link/DdkpxP>
- Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Universidad Nacional de Educación a Distancia. <https://acortar.link/Lxq6PY>.
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. <https://acortar.link/ccZgaN>
- WFO (2024): *Corymbia citriodora* (Hook.) KDHill & LASJohnson . Publicado en Internet; <http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0000925431>
- WFO (2024): *Corymbia torelliana* (F.Muell.) KDHill & LASJohnson . Publicado en Internet; <http://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0000925593> .
- Woods, W.I. (2004). Development of anthrosol research. In: J. Lehmann, D. C. Kern, B. Glaser, & W. I. Woods (eds.), *Amazonian Dark Earths* (p. 1-14). Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic. Recuperado de <https://acortar.link/rigw1T>.
- Yaashikaa, P., Kumar, P., Varjani, S., & Saravanan, A. (2019). Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants. *Bioresource Technology*, 292(122030), 122030. <https://acortar.link/Cc45eY>
- Yaashikaa, P., Kumar, P., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports (Amsterdam, Netherlands)*, 28(e00570), e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Zamora, G. (2020). El biochar de *Guadua angustifolia kunth* procedente de los residuos del aprovechamiento de plantaciones forestales como enmienda orgánica para el suelo. Universidad Nacional Agraria la Molina.

ANEXOS

ANEXO 1. *Tamizado del carbón.*



ANEXO 2. *Preparación de los tratamientos*



ANEXO 3. Preparación del terreno.



Bdigital.ula.ve

ANEXO 4. Aplicación del biocarbón y el hidrogel.



ANEXO 5. Siembra de plantas de *Corymbia*.



Bdigital.ula.ve

ANEXO 6. Medición de diámetro y altura.



ANEXO 7. Afectaciones por agentes externos.



Bdigital.ula.ve