



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

Unidad de Estudios de Posgrado e Investigación

MAESTRÍA EN SISTEMAS AMBIENTALES

T É S I S

Producción de biocarbón a base de residuos sólidos orgánicos, para su
uso en la remediación de suelos de Temascalapa, Estado de México

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN SISTEMAS AMBIENTALES

PRESENTA:

ING. NOHEMI CASIANO SÁNCHEZ
102120008

DIRECTOR(A) DE TESIS:

DRA. MA. TERESA TORRES MANCERA

COACALCO DE BERRIOZÁBAL, MÉXICO, MARZO 2024

ÍNDICE

1. Introducción.....	3
2. Marco Teórico	5
2.1 Biocarbón	6
2.2 Características del biocarbón	9
2.3 Mecanismo de incorporación del biocarbón al suelo	13
2.4 Efectos sobre las propiedades del suelo	14
3. Estado del arte.....	17
3.1 Antecedentes	18
3.2 Experiencias de recuperación de suelos	19
3.3 Aplicación de biocarbón y productividad agrícola.....	20
3.4 Análisis de ciclo de vida de la producción de biocarbón	21
4. Justificación.....	23
5. Objetivos	25
5.1 Objetivo general	26
5.2 Objetivos específicos.....	26
6. Materiales y Métodos.....	27
6.1 Toma de muestra y análisis preliminar de suelo	28
6.2 Preparación de la biomasa.....	30
6.3 Elaboración de biocarbón	31
6.4 Caracterización de biocarbón.....	31
7. Resultados	36
7.1 Toma de muestra y análisis preliminar de suelo	37
7.2 Preparación de la biomasa.....	39
7.3 Elaboración de biocarbón	41
7.4 Caracterización del biocarbón	43
7.5 Dosificación de biocarbón: diseño experimental	45
8. Discusión.....	48
9. Conclusiones	50
10. Referencias	52
REFERENCIAS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concepto general de pirolisis. (Farah, 2022)	7
Figura 2. Diferencias del proceso de pirolisis en la biomasa (Farah, 2022)	9
Figura 3. Ejido muestreado. Fuente propia	38

Figura 4. Toma de muestras. Fuente propia	39
Figura 5. Termogramas y curvas ATD de las maderas de nopal y maguey	40
Figura 6. Residuos orgánicos de maguey y nopal	41
Figura 7. Biomasa de maguey y nopal. Fuente propia	41
Figura 8. Biocarbon producido. Fuente propia.....	42
Figura 9. Biocarbon producido experimentalmente. Fuente propia.. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 10. Concentración elemental del biocarbon. Fuente propia ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 11. Microscopia de barrido del biocarbon. Fuente propia.. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 12. Pruebas de germinacion. Fuente propia.....	46
Figura 13. A) Crecimiento de la raiz sin biocarbon B) crecimiento de la raiz con biocarbon.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones ambientales del biocarbon. (Farah, 2022).....	7
Tabla 2. Pruebas de caracterización de biocarbon (Initiative, 2014).....	31
Tabla 3. Superficie relativa afectada (%) por erosión hídrica por entidad federativa. (González, 2016).....	37
Tabla 4. Municipios con la clase “5 Muy alto” del índice de vulnerabilidad en más del 50% de su territorio (Rodríguez, 2020).....	38
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del suelo. Fuente propia	39
Tabla 6. Condiciones de operación de los procesos de pirolisis y fraccionamiento de los subproductos (Farah, 2022)	42
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas del biocarbon (Nopal/Maguey). Fuente propia	43
Tabla 8. Composición elemental (% peso) del biocarbon. Fuente propia.....	44
Tabla 9. Medidas de crecimiento de la planta en una semana con diferentes concentraciones de biocarbon. Fuente propia.	46

1. Introducción

En 1996 entró en vigor la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, la cual pretende revertir y prevenir la degradación de tierras, mitigar los efectos de la sequía, reducir la pobreza y promover la sustentabilidad ambiental. (Santos, 2016). El término desertificación se remite tanto al desierto físico donde no se siembran alimentos, como áreas desertificadas, donde las precipitaciones son breves y se practica la agricultura de subsistencia; al mismo tiempo es el resultado acumulado de un entorno climático difícil y de la utilización inadecuada de la tierra.

La pérdida de la fertilidad y la degradación del suelo en México es un fenómeno que perturba la producción y abastecimiento de alimentos. Siendo la pérdida de fertilidad una de las consecuencias más críticas de la desertificación, se hace indispensable la adopción de estrategias científicas e innovadoras encaminadas a prevenir y rehabilitar las tierras desertificadas.

Existen tecnologías sustentables que contrarrestan la degradación del suelo, ayudan a recuperar su fertilidad y secuestran el carbono presente en gases de efecto invernadero. El biocarbón es un material sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o carente de oxígeno, el cual tiene propiedades físicas y químicas aptas para el almacenamiento de carbono a largo plazo en un medio natural y mejoran la calidad del suelo (Ibarrola *et al.*, 2013).

La problemática actual en diferentes regiones del país es severa, pero la desertificación se puede combatir con materiales como el biocarbón, que es una alternativa tecnológica que ha sido poco empleada en México y que brinda grandes beneficios.

Durante el desarrollo de este proyecto se producirá y caracterizará biocarbón a base de residuos orgánicos locales del municipio de Temascalapa, y con su empleo se contribuirá a contrarrestar la pérdida de fertilidad, mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

2. Marco Teórico

2.1 Biocarbón

El biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos con escaso o limitado suministro de oxígeno, a temperaturas relativamente bajas, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado. La International Biochar Initiative o IBI (2012) en su “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil”, define al biocarbón como “un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno”. (Santos, 2016)

La materia prima usada para elaborar los biocarbones y las reacciones químicas que ocurren en el proceso de pirólisis definen las características estructurales y químicas específicas para los biocarbones dando origen a materiales muy heterogéneos (Antal y Grønli, 2003; Brick, 2010). Esto se debe a que los componentes orgánicos que conforman la biomasa original influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, lo que define a su vez los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo (Rebolledo, 2016).

El biocarbon es un material barato y una alternativa rentable para la reducir la cantidad de contaminantes debido a sus capacidades excepcionales, que incluyen alta capacidad de sorción, gran área superficial específica, microporosidad y capacidad de intercambio, el biocarbón ofrece múltiples aplicaciones ambientales como lo podemos observar en la Tabla 1. (Farah, 2022)

Aplicaciones	Apurar	Beneficios	Inconvenientes
Catalizador	Asistir en la catálisis de directo reacciones	Bajo costo, un más significativo proporción de grupos funcionales, y una gran superficie.	Reducir la eficiencia.
Almacen de energía	Utilización de materiales como materiales de electrodos	Económico, extremadamente poroso y tiene una amplia superficie.	Bajo rendimiento.
Enmienda del suelo	Aumento de la fertilidad y la calidad de los suelos, así como el carbono secuestro.	Bajo costo, reduce las emisiones de GEI, ayuda a retener nutrientes y agua, y regula la pérdida de nutrientes.	heavy metal y poli hidrocarburo aromático la contaminación permanece.
adsorbentes	orgánicos e inorgánicos se eliminan los contaminantes de el suelo y los sistemas acuáticos.	El costo mínimo y aumentado Los grupos de oxígeno en biochar mejoran la absorción de contaminantes.	Degradación de contaminantes la eficacia es limitada y Los metales pesados se retienen en el suelo.
Compostaje	Mejorando el microbio estructura de la población y carbono mineralización.	Poroso reduce los GEI, tiene una gran superficie y retiene los nutrientes.	Existe la posibilidad de que metales pesados y otros las toxinas se infiltrarán en el suelo.

Tabla 1. Aplicaciones ambientales del biocarbon. (Farah, 2022)

Las tecnologías termoquímicas se consideran comúnmente para transformar la biomasa en fuentes de energía renovable. Éstas pueden ser clasificadas en cuatro categorías generales. El pirólisis ocurre en ausencia completa de oxígeno (Figura 1) mientras que la gasificación se da con reducida cantidad de él, Brick (2010) propone un quinto proceso que es la carbonización hidrotérmica.

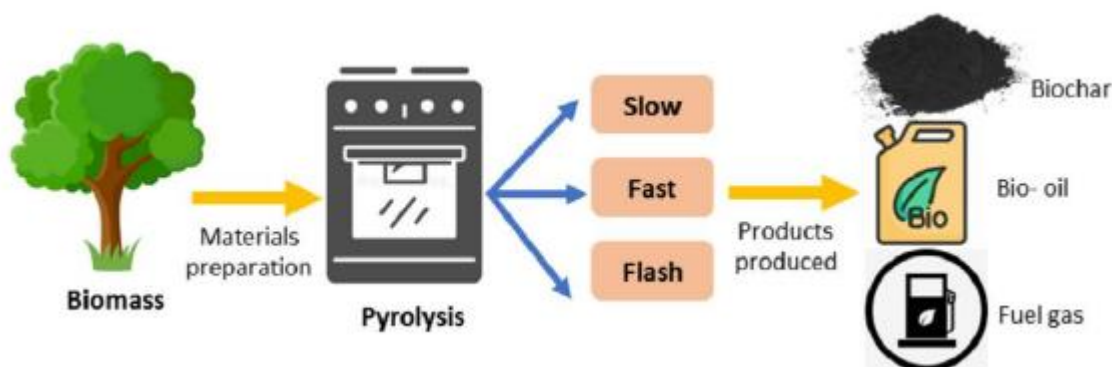


Figura 1. Concepto general de pirólisis. (Farah, 2022)

Pirólisis lento. Se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los sólidos y el gas. De acuerdo con el sistema, los lapsos de calentamientos son cerca de 0.1 a 2 °C por segundo y prevalecen las temperaturas alrededor de los 500 °C. El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que para la biomasa puede ser

de minutos a días (Sadaka, 2007). Según Gheorghe et al. (2009) este sería el proceso con el más alto rendimiento de biocarbón.

Pirólisis rápido. El calentamiento es mayor a $200\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceites y gases ricos en etileno que podrían ser usados para producir alcoholes o gasolina. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Farag et al., 2002; Czernik y Bridgwater, 2004; Sadaka, 2007). El tratamiento provoca la ruptura de los polímeros de los componentes de la biomasa en vapores condensables que forman bioaceite. Además, potencialmente podría ser un método seguro de eliminación de materias primas contaminadas por toxinas (Mullen et al., 2010).

Pirólisis ultrarrápida. Se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas ($400\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$) y las tasas de calentamiento son rápidas ($>2\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$). Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas. Sin embargo, los productos aceitosos obtienen su máximo rendimiento (75 y 80%) (Sadaka, 2007; Demirbas, 2009).

Gasificación. En este proceso la biomasa, especialmente madera, se quema en una secuencia de dos reacciones. La primera es la conversión de madera a carbón y se le llama carbonización con gasificación de la madera. Esto, básicamente, es la misma conversión que ocurre en la pirólisis lenta. Después que el carbón se ha formado, la segunda reacción, con mayor temperatura, convierte el carbón a ceniza y es llamada gasificación de carbón. Si hay demasiado oxígeno entonces todo el carbón es consumido y sólo quedan cenizas. Si la cantidad de oxígeno es limitada, entonces sólo una parte del carbón es consumido y algunos remanentes salen por el fondo del gasificador (McLaughlin et al., 2009).

Carbonización hidrotérmica. Otra tecnología para producir biocarbón es la carbonización hidrotérmica, que consiste en aplicar calentamiento a materiales con gran contenido de agua, como lodos residuales, pulpa de café, estiércoles, algas, entre otros, que son sumergidos en agua, y aunque la temperatura es alta, no se llega a la ebullición (Brick, 2010). Mediante este proceso ha sido posible carbonizar materiales sólidos con lignina y celulosa, y polisacáridos disueltos en agua, con la obtención de productos carbonosos nanoestructurados (Baccile et al., 2010). Asimismo, se pueden producir biocarbones a temperaturas bajas ($\sim 200^\circ\text{C}$) y tiempos muy cortos (Titirici et al., 2007).

Los procedimientos más prevalentes la pirolisis lenta y la rápida, siendo la pirolisis lenta el mejor método práctico para producir biocarbón de alto rendimiento como se muestra en la figura 2. (Farah, 2022)

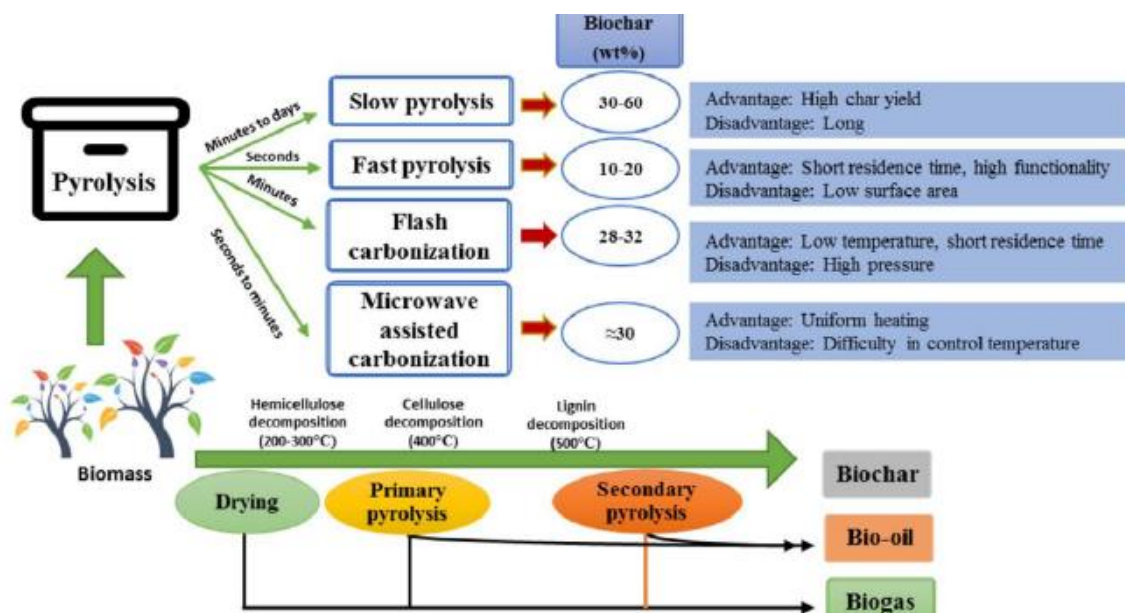


Figura 2. Diferencias del proceso de pirolisis en la biomasa (Farah, 2022)

2.2 Características del biocarbón

Composición estructural: La composición estructural del biocarbón depende estrictamente de la materia prima y el proceso térmico al que se somete esta, pero

en términos generales el biocarbon tiene una forma rígida, color negro (Escalante et al., 2016), estructura amorfa (Qiu, McComb, & Bell, 2008). La estructura de cada partícula del biocarbón está compuesta por dos fracciones: láminas de grafeno cristalino apiladas y estructuras aromáticas amorfas ordenadas al azar. Además, los anillos aromáticos tienen incorporados átomos de H, O, N, P Y S que se encuentran en forma de heteroátomos, debido a la carga química de la superficie del biocarbón (Verheijen, Jeffery, Bastos, Van der Velde, & Diafas, 2009). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del biocarbón y son usados para medir su grado de aromaticidad. También tiene estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables. (Rebolledo, 2016)

En general es amorfo según estudios de microscopía electrónica de barrido realizados por Qiu et al. (2008). El biocarbón está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la materia prima (Lehmann, 2007). Posee una alta porosidad con micro, meso y macroporos, cuyos tamaños van de 50 nm, respectivamente por lo cual lo han comparado con un “arrecife subterráneo” que puede ser hábitat para microorganismos (Rouquerol et al., 1999; Downie et al., 2009). Los macroporos provienen de los propios de la materia prima original y permiten el transporte rápido de sorbatos, para su posterior difusión en el volumen de microporos, ayudando al transporte de moléculas concentradas (Martínez et al., 2006). Los microporos son generados en el proceso de pirólisis, por lo que al aumentar la temperatura aumenta la microporosidad, además generan más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases (Verheijen et al., 2009).

Características químicas: Químicamente, el biocarbón es un material con alta concentración de carbono, por ejemplo de 71.7 a 80.5% de su composición en el trabajo de Cornelissen et al. (2016). Parte del carbono presente estará organizado en de anillos aromáticos. El grado en que ocurra dicha organización (aromaticidad) dependerá de las condiciones en las que se produzca el biocarbón, particularmente

la temperatura a la que se produzca y el tiempo que sufra dicha temperatura (Yuan et al., 2013). El carbono no organizado en láminas aromáticas se encuentra formando diversas sustancias con mayor contenido de hidrógeno y oxígeno que pueden ser removidas aumentando el tiempo y temperatura de pirolisis (Brewer, 2012). A este grupo de sustancias se les llama materia volátil, de acuerdo al estándar para carbones de madera de la ASTM International (2007), se define a la materia volátil como la materia perdida en una atmósfera inerte a 950°C. Finalmente, el biocarbón contiene los elementos inorgánicos (cenizas) que estaban presentes en los materiales que se usaron para fabricarlo (Enders et al., 2012).

Respecto a la presencia de materia volátil, al elevarse la temperatura y el tiempo de reacción, mayores cantidades de materia volátil son removidas del biocarbón, se produce una relación de carbono/hidrógeno alta (Keiluweit et al., 2010).

En general el biocarbón producido a mayores temperaturas tiene pH más elevado (Nguyen y Lehmann, 2009). Los mayores valores de pH a mayores temperaturas probablemente se deben a la pérdida de grupos funcionales ácidos al alcanzarse las mismas.

Características físicas: Las características físicas del biocarbón generalmente estudiadas son la densidad aparente, la porosidad y la Superficie específica (SE). Generalmente, la literatura revisa la densidad aparente de los biocarbones que se analizan. Sin embargo, esta también depende de los espacios vacíos entre partículas, los cuales dependen de los tamaños de partículas del biocarbón. Por lo tanto, diferentes grados de trituración o diferentes tamaños de partícula de materias primas (troncos, pedacería de madera, viruta, aserrín) resultarán en diferentes densidades aparentes. Esto hace que se requiera de precaución a la hora de comparar la densidad de diferentes biocarbones. La densidad de envoltura será una mejor medida para comparar la densidad de los biocarbones de diferentes materiales.

La densidad del biocarbón es en general menor que la de los suelos por lo que puede usarse para reducir la densidad de estos (Herath et al., 2013). Reducir la densidad del suelo puede favorecer el crecimiento de raíces pues las mismas tienen que desplazar el peso del suelo al crecer (Houlbrooke et al., 1997). Diversos estudios han encontrado que la incorporación de biocarbón en el suelo resulta en mayor y más rápido crecimiento de raíces (Xiang et al., 2017).

Se ha producido carbones con una amplia variedad en la SE. Brown et al. (2006) obtuvieron SE de entre 10 y 400 m² g⁻¹ mientras que (van Zwieten et al., 2010) obtuvo valores de hasta 1000 m² g⁻¹. La porosidad y SE dependen en parte de la estructura microscópica de las materias primas que se utilicen (Brewer, 2012). En el caso del biocarbón fabricado a partir de plantas, se conserva parte de las estructuras vegetales (Masiello, 2004). Tanto la porosidad como la SE aumentan al aumentar la temperatura de producción (Brewer, 2012), sin embargo, a partir de cierta temperatura disminuyen esto debido a deformación plástica, sinterización de cenizas y fusión de poros (Brown et al., 2006, Jia y Lua, 2008). Por ejemplo, la SE disminuyó a partir de los 700-800 °C en el estudio de Jia y Lua (2008). La pérdida de área de superficie también puede deberse a la fusión de poros a medida que su tamaño de ambos aumenta (Brewer, 2012). En el estudio de Cornelissen et al. (2016) los biocarbones apagados con agua tuvieron mayores SE que otros fabricados de la misma manera pero apagados con tierra. Es posible el apagado con agua destapa poros que se hayan tapado por cenizas (Cornelissen et al., 2016). Este proceso podría continuar en el suelo aumentando la SE de los biocarbones a través del tiempo (Rafiq et al., 2016).

En la producción de biocarbón por el proceso gasificación, la presencia de oxígeno durante la reacción permite que una parte del material sea removido del biocarbón en formación y propicia la producción de carbones con una mayor SE y porosidad (Zabaniotou et al., 2008). Es probable que dicha remoción forma y/o agranda poros en el material (Zabaniotou et al., 2008). Sin embargo, una remoción excesiva de

material puede causar que se fusionen poros y por lo tanto se reduzca la SE (Zhang et al., 2004).

La resistencia mecánica del biocarbón es influenciada por la estructura de la materia prima, contenido de ceniza y proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina (Aygün et al., 2003). El aumento de la temperatura y el tiempo de reacción, reducen la cantidad materia en el biocarbón, sin embargo, también aumenta su densidad esquelética (Kercher and Nagle, 2002). Por lo tanto, deberá existir un punto intermedio en el que se obtiene la mayor resistencia mecánica para cualquier material.

2.3 Mecanismo de incorporación del biocarbón al suelo

Los mecanismos de mayor utilidad son la técnica del arado del suelo y la técnica manual, estas consideran un conjunto de factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas (temperatura y humedad), las prácticas de cultivo, la erodabilidad y tipo de suelo (Balta, 2014). Además, se considera la profundidad que puede ser superficial o profunda, en la incorporación superficial (0-30 cm) se obtiene una homogenización completa con el suelo, en cambio en la incorporación profunda (> 30 cm) el biocarbón se introduce muy cercana de las raíces obteniendo así una mayor captación de nutrientes por parte de la planta (Escalante et al., 2016). Por otro lado, la cantidad y la repetitividad de la aplicación del biocarbón debe estar basado en resultados experimentales según el tipo de cultivo, ya que el efecto el biocarbón tiene la propiedad de recalcitrancia que le permite perdurar por un largo periodo en el suelo (Major, 2011).

Para aplicar biocarbón al suelo se deben considerar una serie de factores: (1) los relacionados con el suelo (tipo y erodabilidad), (2) prácticas de cultivo, (3) condiciones del entorno (clima, humedad), (4) la forma de aplicación (con maquinaria o manual, superficial a 0-30 cm o a mayor profundidad > 30 cm, en banda o cerca de las raíces), entre otras cosas (Rebolledo, 2016)

2.4 Efectos sobre las propiedades del suelo

Efectos en las propiedades físicas Los efectos del biocarbón en el suelo son múltiples, entre los que se encuentra la mejora del área superficial, la estructura la distribución del tamaño de los poros, la densidad aparente, capacidad de retención del agua (Cha et al., 2016) y la resistencia a la penetración. El aumento del área superficial contribuye a la formación de complejos (aniones y cationes) con metales y elementos del suelo, lo que aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo (Mukherjee & Lal, 2013). Mientras tanto, la disminución de la densidad aparente se debe a que el biocarbón presenta menor densidad que los minerales presentes en el suelo y tiene una distribución mayor de macro, meso y microporos (Paco, 2012).

Efectos en las propiedades químicas La presencia del biocarbón en el suelo genera un aumento en 20% de la capacidad de intercambio catiónico y el cambio de hasta 1 unidad en el valor del pH (Laird et al., 2010). Asimismo, se ha observado una mayor capacidad de la conductividad eléctrica y concentraciones de aniones y cationes solubles (Cha et al., 2016). Por otro lado, el biocarbón permite la mejora de la calidad del suelo ácido, ya que este presenta grupos funcionales fenólicos, carboxilo e hidroxilo, que reaccionan con los iones H^+ en el suelo para reducir la concentración de iones H^+ y aumentar el pH del suelo (Qian et al., 2015). Además, se le atribuye el suministro de componentes inorgánicos como el calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y fósforo (P) y la mitigación de la lixiviación de los nutrientes (Zhang, Zhu, Shen, & Liu, 2019).

Efectos en la biota del suelo La aplicación del biocarbón permite gestionar la biodiversidad en los suelos (Lehmann et al., 2011), ya que las enmiendas orgánicas impactan en la estructura trófica de la red alimenticia del suelo. La abundancia microbiana mejoró después de la adición de biocarbón, esto debido a los cambios del pH y el contenido de agua del suelo (Abujabhah, Bound, Doyle, & Bowman, 2016).

Cambios en las características del suelo al aplicar biocarbón Debido a su porosidad, el biocarbón es menos denso que la mayoría de los suelos por lo que se lo puede usar para reducir la densidad aparente de los mismos (Herath et al., 2013). En un estudio de Jien y Wang (2013) se redujo la densidad del suelo de 1.42 a 1.15 Mg m^{-3} aplicando 2.5% por peso de biocarbón, los autores atribuyen la reducción en la densidad principalmente al aumento en la porosidad del suelo y la promoción en la formación de agregados por el biocarbón. Otro ejemplo de aumento en la formación de agregados es el estudio de Ouyang et al. (2013) o el de Carter et al. (2013)

También se ha observado que el biocarbón tiene una influencia en la textura (Tryon, 1948, citado por: Herath et al., 2013), pues puede tener una amplia variedad en el tamaño de sus partículas (Herath et al., 2013). El biocarbón puede actuar como un agente alcalinizador o acidificador en el suelo, su efecto dependerá de las características del biocarbón que se aplique (Brewer, 2012).

El biocarbón también puede elevar la CIC en los suelos y este es un efecto que aumenta con el paso del tiempo debido a la adsorción por el biocarbón de materia orgánica soluble en agua y probablemente también a la oxidación de sus superficies (Liang et al., 2006; Prost et al., 2012). Ejemplos de mejora en la CIC en suelos son el estudio de Jien y Wang (2013) en el que se aumentó la CIC de 7.41 a 10.8 cmolc kg⁻¹ con una aplicación de 5% por peso. Otro ejemplo un estudio donde se elevó la CIC de un suelo con CIC alta (17.1 cmolc kg⁻¹) en un 21% (20.7 cmolc kg⁻¹) con una aplicación de biocarbón de 1% por peso (Laird et al., 2010)

Las propiedades hídricas del biocarbón están determinadas por su tamaño de partícula, forma de sus partículas y su porosidad (Liu et al., 2017). El tamaño de partículas tiene una influencia en la retención de agua por parte del biocarbón. Głąb et al. (2016) encontraron que partículas pequeñas (0–500 μm) tenían mejor retención de agua disponible para la planta en un suelo arenoso. En contraste, Zhang et al. (2016) encontraron que partículas demasiado finas reducían la

retención de agua por haber perdido su porosidad original. Otro factor influyente en la retención del agua es la hidrofobicidad e hidrofilia del biocarbón (Gray et al., 2014). En cuanto a la retención de agua, esta ha sido incrementada por el biocarbón en algunos estudios (Abel et al., 2013; Carvalho et al., 2014; Ouyang et al., 2013; Yu et al 2013), aunque también resultó no tener efecto en la misma en otros (Hardie et al., 2014; Zwart and Hummelink, 2014). Las mejoras en la retención de agua a veces requieren de aplicaciones de biocarbón altas, por ejemplo (Carvalho et al., 2014) solo observó un aumento de 0.8% en el agua disponible para la planta por cada Mg ha⁻¹. Sin embargo, también se han logrado incrementos importantes con aplicaciones pequeñas como Ouyang et al. (2013) que aplicando 2% por peso obtuvo aumentos de 10.6% de ADP en un suelo franco-arenoso y notablemente de 5.2% de agua disponible para la planta en un suelo arcillo-limoso.

La infiltración de agua también ha aumentado con la incorporación de biocarbón (Abel et al., 2013, Ouyang et al., 2013), sin embargo, no ha habido mucha consistencia en esta propiedad del biocarbón (Hardie et al., 2014; Ojeda et al., 2015). La conductividad hidráulica casi se duplicó en el estudio de Jien y Wang (2013) (16.7 a 30 cm hr⁻¹) al incorporar 2.5% por peso de biocarbón.

Además de los cambios que se han observado en la física y la química del suelo, también se han observado cambios en la biología del suelo después de aplicar biocarbón. Entre estos cambios podemos mencionar los cambios en la población de micorrizas que de acuerdo con la revisión de Warnock et al. (2007) son en su mayoría positivos pudiendo alcanzar incrementos de hasta 610% con una aplicación de biocarbón de 8 Mg ha⁻³ (Ishii y Kadoya, 1994). La fijación biológica de nitrógeno también puede aumentar por la presencia de biocarbón en el suelo, por ejemplo en el estudio de Rondon et al. (2007) donde se aumentó en el suelo el nitrógeno derivado de la atmósfera hasta en un 78% tras la aplicación de 60 kg Mg⁻¹ de biocarbón.

3. Estado del arte

3.1 Antecedentes

En base a la investigación realizada por Pérez Cabrera (2021) algunas de las investigaciones más relevantes a nivel internacional y nacional en los últimos 10 años, a continuación, se describen brevemente las investigaciones que se han realizado:

Silva y col. (2017) evaluaron tres biocarbones en dosis de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10% v/v en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) y encontraron que, independientemente del biocarbón usado, estos promovieron mayor desarrollo de la planta de frijol con un aumento en la masa seca de raíz y tallo, el número de vainas, el número y la masa seca de los granos, en comparación con el tratamiento control. En general, las dosis de 10, 7 y 7% de biocarbón de cascarilla de arroz, aserrín y sorgo ensilado, respectivamente, generaron el mayor número de vainas, número de granos y en consecuencia, mayor producción de materia seca en grano de frijol.

Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes (2020) evaluaron cinco temperaturas (350, 450, 550, 650 y 750 °C) en la elaboración de biocarbón de bambú producido mediante pirólisis lenta y obtuvieron que la mejor temperatura para la producción de biocarbón de bambú fue a 550 °C con rendimiento de conversión de 27%, además, con ese tratamiento se presentaron los mayores valores en las propiedades físicoquímicas con 11.2% de volátiles, 8.1% de cenizas y 72% de carbón. Velázquez-Maldonado et al. (2019) reportaron que para la elaboración de biocarbón de cascarilla de arroz, la adición de los ácidos maleico y cítrico al 10% como catalizadores, generan el mayor rendimiento de conversión (66%).

Los mismos autores indicaron que los tres macronutrientes con mayor concentración fueron Ca, N y K, mientras que para micronutrientes los de mayor concentración fueron Fe y Mn, así como el elemento Na. Velázquez-Machuca et al (2019) evaluaron el uso potencial del biocarbón de lodos residuales obtenidos de una planta de tratamiento de aguas residuales de Morelia, Michoacán, como mejorador de suelos agrícolas al considerar como indicadores las propiedades

físicas y químicas del material, así como el contenido de nutrimentos y su concentración baja de metales tóxicos. Esta investigación concluye que el biocarbón elaborado puede utilizarse como mejorador de suelos agrícolas por su alto contenido de nutrimentos y posee bajo riesgo ambiental debido a su bajo contenido de metales tóxicos.

Medina y Medina (2018) construyeron y evaluaron el desempeño en condiciones de campo, de un prototipo de biocarbón-pirólisis autotérmico y móvil, con volumen útil de 1.7 m³ de biomasa triturada. En el equipo mencionado anteriormente, el cual tenía capacidad para procesar entre 300 y 400 kg de biomasa por día, elaboraron biocarbón de residuos de poda de aguacate, con un rendimiento de 16% en biocarbón.

Por su parte, Concilco-Alberto y col. (2018) al evaluar un biocarbón comercial de bambú en el crecimiento y rendimiento de avena forrajera, reportaron que el mejor tratamiento fue 25 t ha⁻¹ de biocarbón con fertilización convencional NPK (120-60-00), ya que incrementa 34% la altura de planta y en 103% la materia fresca en comparación al tratamiento testigo.

Escalante-Rebolledo y col. (2016) realizó una revisión acerca de la naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo del biocarbón. Como se puede apreciar, en México existe un interés creciente en el uso de biocarbón, pero hacen falta más investigaciones para fortalecer el aprovechamiento del biocarbón en sistemas de producción agrícola.

El artículo realizado por Dengyu Chena y col. (2022) se investiga la cinética, la evolución volátil y la caracterización del producto de los tres componentes principales del biocarbon, mostrando que los tres están estrechamente relacionados.

3.2 Experiencias de recuperación de suelos

Existen numerosas experiencias en la recuperación de suelos utilizando el biocarbón, como es el caso que describe Fiallos-Ortega et al. (2016) donde utilizó

biocarbón para la restauración ecológica del suelo y evaluó este resultado con el crecimiento de la alfalfa *Medicago sativa*, el resultado de esta evaluación fue el aumento la cobertura basal en 39,35 % y la cobertura aérea en 86,0%.

Otra experiencia en el uso de biocarbón es el que describe Jones, Rousk, Edwards-Jones, DeLuca, & Murphy,(2012), que estudiaron en impacto multianual de biocarbón en la calidad del suelo con énfasis en el ciclo del carbono y nitrógeno durante tres años; encontrando como resultado el aumento de la respiración del suelos, tasa de crecimiento de los microorganismos y el rendimiento de las plantas cultivada (gramíneas).

Por su parte Mohamed et al., (2015) estudiaron los efectos del biocarbón de bambú para la recuperación de suelos agrícolas contaminados de Cd; se obtuvo como resultado la disminución de Cd en el suelo debido al aumento de las tasas de biocarbón

También se desarrollaron investigaciones para mejorar la adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos al someter al biocarbon a un breve paso de oxidación con aire térmico. El biocarbon elaborado a partir de materiales ricos en lignina, se ven beneficiados con este tipo de tratamientos para mejorar la capacidad de adsorción. (Xiao, 2022)

3.3 Aplicación de biocarbón y productividad agrícola

El aumento en las cosechas tras la aplicación de biocarbón no está garantizado, de acuerdo a un meta-análisis de 27 estudios realizado por Baidoo et al. (2016) quienes encontraron que la aplicación de biocarbón resultaba en un promedio de aumento de cosechas de 10%, teniendo en ocasiones un efecto negativo. Otro estudio (Jing et al., 2017) encontró un aumento promedio de 15% y notaron en su análisis que la mejora depende del biocarbón utilizado y el suelo donde se utilice, siendo los suelos arcillosos y los suelos ácidos los que se vieron más beneficiados de la aplicación de biocarbón.

Los anteriores análisis se realizaron a nivel global y no diferenciaron entre climas templados o tropicales. En contraste, Jeffery et al. (2017) hicieron dicha diferenciación y encontraron que en los trópicos el biocarbón aumentó las cosechas en un promedio de 25% en diferentes estudios mientras que en promedio no tuvo efecto en los climas templados. Los autores atribuyen esta diferencia a la frecuente acidez, baja fertilidad y aplicación de fertilizantes en los suelos tropicales.

Los estudios analizados en estos trabajos por lo general prueban diferentes condiciones de producción de biocarbón (Baidoo et al., 2016; Jeffery et al., 2017; Jing et al., 2017), esto significa que se incluyen en el análisis biocarbones producidos en condiciones extremas como de más de 800 °C o tan bajas como 200 °C. Por lo tanto, los promedios obtenidos son correctos para el biocarbón en general, pero no necesariamente para biocarbones de diseño producidos en condiciones óptimas con base en experiencias previas.

Ninguno de estos estudios incluyó pruebas de biocarbón producido por pirolisis por cortina de llama (Schmidt et al., 2015). Con este tipo de pirolisis se han logrado en campo aumentos en la productividad de hasta 300% (Schmidt et al., 2015). Algunas materias primas con las que se ha producido biocarbón

Existen muchas investigaciones en las que se ha caracterizado el biocarbón producido con diferentes materias primas. Los materiales que se han usado incluyen la paja de arroz (Peng et al., 2011), pastos, desechos de maíz, maderas duras (Brewer, et al., 2009), maderas blandas (Abdulrazzaq et al., 2014), cáscara de cacahuete, estiércol de pollo (Novak, Lima y Xing, 2009), y hueso (Novotny et al., 2012), entre otros

3.4 Análisis de ciclo de vida de la producción de biocarbón

En el trabajo de Roberts et al. (2010) se analizó el ciclo de vida de la producción y uso de biocarbón con tres materias primas. Se estimaron la energía neta obtenida durante la pirolisis, el carbono secuestrado, los gastos realizados y las ganancias potenciales. Encontraron que tanto la economía como el secuestro de carbono

fueron superiores utilizando desechos

Otro estudio donde se analiza el ciclo de vida es el de Gaunt y Lehmann (2008) en el que se analiza la producción de energía y emisiones de gases de invernadero evitadas en operaciones de producción bioenergía con plantas especializadas para este fin, así como la producción de energía y emisiones de gases de invernadero evitadas produciendo biocarbón con desechos agrícolas. Encontraron que ambos valores eran superiores en la producción de biocarbón usando desechos que trabajando con cultivos bioenergéticos convencionales

Además de los cambios que se han observado en la física y la química del suelo, también se han observado cambios en la biología del suelo después de aplicar biocarbón. Entre estos cambios podemos mencionar los cambios en la población de micorrizas que de acuerdo con la revisión de Warnock et al. (2007) son en su mayoría positivos pudiendo alcanzar incrementos de hasta 610% con una aplicación de biocarbón de 8 Mg ha⁻³ (Ishii y Kadoya, 1994). La fijación biológica de nitrógeno también puede aumentar por la presencia de biocarbón en el suelo, por ejemplo en el estudio de Rondon et al. (2007) donde se aumentó en el suelo el nitrógeno derivado de la atmósfera hasta en un 78% tras la aplicación de 60 kg Mg⁻¹ de biocarbón

4. Justificación

El biocarbón es el resultado de la carbonización de materias primas como: residuos de cosecha, biomasa de árboles, desechos de papel, cascarilla de arroz, entre otros, se puede obtener de casi cualquier material orgánico, pero es más apropiada la de origen vegetal, sobre todo la constituida por materiales lignocelulósicos, (Cabrera, 2021).

El biocarbón provoca cambios positivos en el suelo ya que favorece sus propiedades y el crecimiento de los cultivos. También contribuye a reducir el impacto del cambio climático, por estar constituido principalmente por formas resistentes a la oxidación, con lo que el carbono puede permanecer por largo tiempo en el suelo sin regresar a la atmósfera. (Rebolledo, 2016)

La interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas determinan la fertilidad del suelo, las cuales pueden ser modificadas positivamente con la adición de biocarbón y puede favorecer el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

La gestión sustentable del suelo y de los cultivos que en él se siembran contribuiría a la recuperación de la fertilidad perdida en este componente fundamental del agroecosistema

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Producir biocarbón a partir de residuos orgánicos, para la remediación de suelos del estado de México

5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar pruebas fisicoquímicas en suelos semiáridos de la región de Temascalapa
- Obtener biocarbon por método de pirolisis lenta
- Caracterizar con base a pruebas fisicoquímicas biocarbón de acuerdo con la biomasa utilizada como materia prima y al proceso de obtención
- Analizar en suelos del Estado de México, dosis y forma de aplicación para uso en la conservación de suelos agrícolas.

6. Materiales y Métodos

6.1 Toma de muestra y análisis preliminar de suelo

Toma de muestra. Se efectuó de acuerdo con un método normalizado, teniendo en cuenta las características del terreno. Por medio de una pala o azadón, se cavo un hoyo, en forma de v, de unos 20 cm de profundidad, se cortó una rebanada de uno de los lados y la parte central de la rebanada se pasa a la bolsa, despreciando los bordes. Se repitió la misma operación unas veinte veces, poniendo todas las submuestras tomadas en un saco de tela o en bolsa o cubeta de plástico, hasta completar unos 2 Kg. de suelo. Estas tomas de submuestras se efectuarán recorriendo la parcela en zigzag.

Análisis preliminar de suelo. Se realizó un análisis de suelo antes de siembra en el laboratorio, se determinaron valores de pH, conductividad eléctrica, densidad, humedad, carbono orgánico y materia orgánica en el suelo. Antes de proceder a los análisis, la muestra de suelo se secó al aire a temperatura ambiente durante un tiempo de veinticuatro horas, y posteriormente se guardó en refrigeración a 4°C.

Humedad- Se pesaron 10 g de suelo seco al aire en un crisol de porcelana y colocó la muestra en la estufa a temperatura 100-110°C durante mínimo 24 h. Se retiró la muestra de la estufa y se colocó en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, posteriormente se pesó la muestra y anotó el peso de suelo seco en la estufa. Se realizaron cálculos del porcentaje de humedad (fh) en base a la ecuación 1:

$$\text{Humedad a capacidad de campo (\%)} = \frac{P_{hum} - P_{sec}}{P_{sec}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Medición de pH. En un vaso de precipitado se colocaron 10 g de suelo y 25 ml de agua destilada, se mantuvo en agitación durante 5 minutos y dejó reposar 30 minutos. Con el potenciómetro previamente calibrado se midió el valor de pH. Al terminar se enjuago perfectamente el electrodo para eliminar todo exceso de partículas de suelo y secarlo con papel absorbente.

Conductividad eléctrica. Se pesaron 100 g de suelo y se colocaron en un vaso de precipitados, el cual se llevó al 100% de capacidad de retención de agua. Se adicionó suficiente agua destilada hasta observar 2 mm de agua por encima de la superficie del suelo teniendo precaución de no hacer espuma. Tapado con papel aluminio se dejó reposar durante 24 horas en refrigeración. Se decantó el agua y se colocó el líquido en un vaso de precipitado de 10 ml, con un conductímetro, se midió la conductividad en miliSiemens (mS).

Materia orgánica En el método desarrollado por Walker y Black (1947), la materia orgánica del suelo se oxida mediante el calor de la reacción del dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico, formando ácido crómico cuyo exceso es valorado por titulación con sulfuro ferroso y el indicador difenilamina. Además, se adiciona ácido fosfórico para eliminar la acción ocultante de los ácidos de hierro y como contribuyente al viraje de la solución

Se pesaron 0.5 g de suelo y colocaron en un matraz erlenmeyer, se agregó 5 mL de solución de dicromato de potasio, y 10 mL de ácido sulfúrico poco a poco con mucho cuidado, resbalando por las paredes; se agito un minuto y se dejó reposar durante 30 minutos más. Se agregaron 100 mL de agua destilada, 5 mL de ácido fosfórico y 3 gotas del indicador de difenilamina. Se tituló con sulfuro ferroso, durante la titulación la secuencia de cambios de color al vire final es la siguiente: negro, verde muy oscuro, azul y finalmente verde esmeralda

Se realizó un blanco para verificar la normalidad del sulfato ferroso siguiendo los pasos 3 a 9 y sustituyen los resultados obtenidos en la ecuación 2 para determinar la cantidad de materia orgánica:

$$\text{Materia Orgánica (\%)} = \frac{5 * (\text{ml de FeSO}_4 * N * FC)}{\text{g de la muestra}} \times 0.69 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

5= ml de dicromato de potasio agregados

N= Normalidad de sulfato ferroso (0.05)

FC= Factor de corrección

0.69: Constante

El factor de corrección se obtiene a partir de la ecuación 3:

$$FC = \frac{10}{\text{mL de FeSO}_4 \text{ gastados en el blanco}} \dots\dots\dots(3)$$

Carbono orgánico. Se pesaron 1 g de suelo y adicionan 10 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N y 30 ml de mezcla de ácidos. Se dejó enfriar y se tituló con Sulfato ferroso 0.5 M, adicionando 5 gotas de difenilamina. Se prepara un blanco de reactivos y titular con Sulfato ferroso 0.5 M, se obtuvieron datos de carbono orgánico bajo la ecuación 4:

$$CO = \frac{M(B-T)0.003*100*1.3*mcf}{W} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

C.O = Carbono Orgánico (mgC / g Suelo)

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml)

M = Molaridad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

W = Peso de la muestra empleada (g).

mcf = Factor de corrección de humedad (1- (%H/100))

6.2 Preparación de la biomasa

Las muestras fueron recolectadas en el ejido de San Bartolomé Actopan en el municipio de Temascalapa, estado de México, El lugar se caracteriza por ser un sitio semiárido con precipitaciones pluviales escasas. .

En relación a los residuos orgánicos generados en la zona, se seleccionaron como biomasa principal muestras de maguey (*agave salmiana*) y pencas de nopal (*Opuntia streptacantha*), ambas biomasas son residuos que resultan de la poda y envejecimiento de la planta.

La biomasa fue limpiada y cortada en trozos, con medidas cercanas a los 3 cm x 3 cm para ser colocadas en la estufa a temperatura 80°C durante una semana para su secado.

6.3 Elaboración de biocarbón

La producción de biocarbon a pequeña escala fue realizada con una mufla y crisoles perfectamente cerrados con papel aluminio, a 350° C durante 60 minutos

El rendimiento en la producción de biocarbón se calculó considerando la masa del biocarbón obtenido con respecto a la masa de la biomasa inicial, tal y como se muestra en la ecuación 5

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{\text{masa del biocarbón obtenida(g)}}{\text{masa de la biomasa inicial(g)}} \dots\dots\dots(5)$$

6.4 Caracterización de biocarbón

Para la caracterización fisicoquímica de los biocarbones fue necesario triturarlos en un mortero de porcelana. La caracterización se realizó con base a la metodología de la Iniciativa Internacional de Biochar como se muestra en la Tabla 2

Parámetro	Metodología
pH	Rajkovich <i>et al.</i> (2011).
Conductividad eléctrica (Puentes de intercambio)	Rajkovich <i>et al.</i> (2011).
Capacidad de intercambio catiónico (Acetato de amonio)	Uehara y Gillman, (1995).
Nitrógeno total (Micro Kjeldahl)	Bremmer, (1996).
Fósforo disponible (Olsen)	Rajan <i>et al.</i> (1992); AOAC (2005); Wang <i>et al.</i> (2012).
Humedad	ASTM D1762-84.
Cenizas	ASTM D1762-84.
Materia volátil	ASTM D1762-84.
Capacidad de retención de agua	Método del embudo.
Densidad aparente	Columnas de Colman.
Índice de inhibición de germinación	OECD methodology (1984); Zwieten <i>et al.</i> (2010).

Tabla 2. Pruebas de caracterización de biocarbon (Initiative, 2014)

Análisis fisicoquímico elemental. El biocarbón obtenido en las condiciones de temperatura y de tiempo de residencia se evaluó en un laboratorio, se caracterizó en % de cenizas (ASTM D1102-84), de material volátil (ASTM E 872-82) y de carbón fijo (ASTM E870-82 – re aprobado 2006). Haciendo determinaciones por duplicado.

Densidad aparente En un recipiente de volumen conocido (probeta de 500 ml) se llenó carbón pulverizado lentamente con la ayuda de una espátula hasta llegar a nivel de 300 ml y se dio tres golpecitos contra una base dura con el fin de tapar posibles espacios de aire en el recipiente. Se registró el peso y volumen en la probeta, para realizar los cálculos respectivos. Para el cálculo se aplicó la ecuación 6:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{masa del carbón en gramos}}{\text{volumen del carbón en mililitro}} \dots \dots \dots (6)$$

Conductividad eléctrica De acuerdo a la norma 04.11 de TMECC (US Composting Council and US Department of Agriculture, 2001) y la investigación de Rajkovich et al. (2011) se realizó el ensayo con una dilución de 1:20 (biocarbón – agua destilada), se agregó un gramo de biocarbón en 20ml de agua destilada, luego fueron colocados en un agitador orbital marca durante 1 hora a 30 ± 1 rpm y 25 ± 0.25 °C. Posteriormente se filtró la mezcla con papel número 393 (100 mm) y se tomó la medición en el filtrado con un conductímetro, el resultado se reportó en $\mu\text{S/cm}$

pH se agregó 1 gramo de biocarbón y 20 ml H₂O destilada, se agitó por 1 hora a (30 ± 1) 28 rpm, a una temperatura de (25.00 ± 0.25) °C con el agitador orbital. La suspensión obtenida se midió directamente con un medidor de pH

cra se pesaron 20 g de biocarbon previamente secados durante 24 horas a 110°C. posteriormente se colocaron en un papel filtro con peso seco y húmedo conocido sobre un embudo de filtración, y se adicionaron 100 ml de agua de la llave. inmediatamente se tapó el embudo con papel filtro tanto la parte superior como la inferior para evitar pérdidas de agua por evaporación, y se dejó reposar 24 horas. transcurrido el tiempo se

dejó fluir el filtrado y se pesó el papel filtro con el biocarbon húmedo, posteriormente se aplicaron las ecuaciones 7 y 8

$$APF = \frac{\text{peso del papel humedo} - \text{peso del papel seco}}{\text{peso del papel seco}} \dots\dots\dots(7)$$

$$CRA = \frac{P_m - PSS - PPF - APF \times 100}{PSS} \dots\dots\dots(8)$$

CRA = capacidad de retención de agua

P_m = peso de la muestra húmeda después de 24h, g

PSS = peso del biocarbon seco, g

PPF = peso del papel filtro seco, g

APF = gramos de agua absorbida por gramo de papel filtro

Contenido de humedad: Se partió de 1.5 g del carbón molido y cribado con un tamaño de partícula de 425 µm. La muestra se colocó en una estufa durante dos horas a 105° C. Ecuación 9.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{W-R}{W} \times 100 \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

W: Masa inicial de biocarbón (mg)

R: Masa de biocarbón medida a una temperatura 105°C (mg)

Material volátil: los crisoles con las tapas colocadas y con la muestra de humedad conocida, se colocaron de la siguiente manera: con la puerta del horno abierta, durante 2 min en el borde exterior del horno (300 °C) y luego durante 3 min en el borde del horno (500°C). Luego mueva las muestras a la parte trasera del horno durante 6 minutos con la puerta de la mufla cerrada a 600°C. Enfriar las muestras en un desecador durante 1 h y pesar

El porcentaje del material volátil se estimó por diferencia de peso entre la masa del carbón anhidro y la masa de la muestra después de exponerla a 600° ecuación 10.

$$\% \text{ de volatiles} = \frac{R - S}{W} \times 100 \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

W: Masa inicial de biocarbón (mg)

R: Masa de biocarbón medida a una temperatura 105°C (mg)

S: Masa de biocarbón medida a una temperatura 600 °C(mg)

Contenido de cenizas: la muestra libre de humedad y material volátil se sometió a 750° C en la mufla durante siete horas, posteriormente se enfrió y pesó. Enfríe los crisoles con las tapas colocadas en un desecador durante 1 hora y péselos, ecuación 11

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{T}{W} \times 100 \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

W: Masa inicial de biocarbón (mg)

T: Masa de biocarbón medida a una temperatura 750°C (mg)

Carbón fijo: Se estimó en base a el contenido de humedad, material volátil y cenizas a la masa del carbón molido y tamizado (Márquez-Montesino et al., 2001). Ecuación 12.

$$\% \text{ de carbono fijado} = \frac{S - T}{W} \times 100 \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

W: Masa inicial de biocarbón (mg)

S: Masa de biocarbón medida a una temperatura 600°C (mg)

T: Masa de biocarbón medida a una temperatura 750°C (mg)

Caracterización morfológica: se molió un 1 gramo de biocarbon y la muestra se analizó con un microscopio electrónico de barrido (SEM)

6.5 Dosificación de biocarbón: diseño experimental

Por lo que a partir del diseño experimental, se procedió a tomar 40 gramos de suelo y se dosificó con biocarbon en diferentes concentraciones 5 % (0.5:10), 10 % (1:10) y 15%(1.5:10) cada uno por triplicado.

Ensayo de germinación

Se utilizaron los cultivares de cebada forrajera variedad como especie indicadora de germinación. En esta etapa experimental se midió el porcentaje de germinación en vasos de plástico de 5 cm de altura y de 3 cm de diámetro. Cada uno de los vasos contenía 45 g de mezcla suelo/biocarbón de los 3 diferentes tipos de concentraciones. Además se colocó un control, el cual contenía suelo sin biocarbón. Las mezclas suelo/biocarbón fueron humedecidas con agua de la llave. Se colocaron 2 semillas en cada uno de los vasos, las cuales se pusieron en una cámara de germinación regulada a una temperatura ambiente. Fue necesario mantener la humedad, por lo que se aplicó agua de la llave con un atomizador sin mover las semillas. Se cuantificaron semillas germinadas a los 7 y se midió raíz, tallo y follaje, se pesaron las plántulas en seco y húmedas.

7. Resultados

7.1 Toma de muestra y análisis preliminar de suelo

En base al artículo “Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo” (González, 2016), uno de los estados con mayor superficie relativa afectada por erosión hídrica es el estado de México (Tabla 3).

Estado	Extrema	Fuerte	Leve	Moderada	Zona de exclusión	Suelo estable	Total erosión	Erosión apreciable
Aguascalientes	6.04	5.16	29.34	56.56	2.91	0.00	97.09	11.20
Baja California	4.85	3.35	32.90	15.61	42.36	0.92	56.72	8.21
Baja California Sur	10.33	8.93	33.39	20.03	27.32	0.00	72.68	19.26
Campeche	0.40	0.79	40.21	22.83	19.25	16.52	64.23	1.19
Chiapas	2.59	4.17	61.60	13.12	16.74	1.79	81.48	6.76
Chihuahua	10.32	7.34	30.23	33.80	17.57	0.74	81.69	17.67
Coahuila de Zaragoza	8.49	6.59	33.72	34.10	15.86	1.25	82.89	15.07
Colima	3.71	6.91	49.75	17.79	20.61	1.22	78.17	10.62
Distrito Federal	46.67	4.44	16.05	27.52	0.76	4.55	94.69	51.12
Durango	9.61	7.98	34.63	25.22	22.00	0.56	77.44	17.59
Estado de México	13.79	8.27	20.21	38.92	8.19	10.62	81.19	22.06

Tabla 3. Superficie relativa afectada (%) por erosión hídrica por entidad federativa.

(González, 2016)

En el trabajo “Vulnerabilidad agrícola por sequía: propuesta y validación metodológica para el estado de México” (Rodríguez, 2020) se identificó a los municipios que presentan el mayor grado de vulnerabilidad ante la sequía meteorológica en el Estado México (Tabla 4)

Nombre del municipio	Superficie por valor	Porcentaje
Temoaya	18698.47891	100
Morelos	23184.59126	98.957981
Chapa de Mota	28404.67653	97.86169
Villa del Carbón	29389.57626	97.50348
Jocotitlán	24069.62206	87.334905
Nopaltepec	7034.56925	85.714856
Temascalapa	13459.79496	82.320158
Polotitlán	10317.26202	82.059361
El Oro	10988.01132	80.456275

Tabla 4. Municipios con la clase “5 Muy alto” del índice de vulnerabilidad en más del 50% de su territorio (Rodríguez, 2020)

Tomando en cuenta los datos bibliográficos mencionados en los párrafos anteriores se estableció como punto de muestreo un ejido de la localidad de San Bartolomé Actopan en el municipio de Temascalapa (Figura 3).



Figura 3, Ejido muestreado. Fuente propia

Para la toma de muestras de suelo se cava un hoyo, en forma de v, de unos 20 cm de profundidad, se cortó una rebanada de uno de los lados y la parte central de la rebanada se pasó a la bolsa, despreciando los bordes, se repitió la misma operación unas veinte veces, se colocaron todas las submuestras en una cubeta de plástico,

hasta completar unos 2 Kg. de suelo. Estas tomas de submuestras se efectuarán recorriendo la parcela en zigzag (Figura 4).



Figura 4. Toma de muestras. Fuente propia

El suelo fue trasladado a laboratorio y secado a sombra durante 24 horas, posteriormente fue pasado por un tamiz para realizar la caracterización fisicoquímica inicial del mismo, los resultados se muestran en la tabla 5.

Característica	Resultados
% de humedad	3.8 %
pH	8.44 $\mu\text{s/cm}$
Conductividad eléctrica	348
Materia orgánica	6.39
Densidad aparente	0.5197 g/ml

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del suelo. Fuente propia

7.2 Preparación de la biomasa

La biomasa y temperatura influyen sobre las propiedades fisicoquímicas del biocarbón. La biomasa está compuesta por varios componentes como: hemicelulosa, celulosa, lignina y compuestos volátiles, que se descomponen a

diferentes temperaturas, por lo tanto, la velocidad de calentamiento, la temperatura y el tiempo de residencia son fundamentales

Considerando las actividades y los residuos generados en la región, se eligió para la producción de biocarbon las pencas de nopal forrajero (*Opuntia streptacantha*) y maguey (*Agave salmiana*). De acuerdo con estudios realizados por Calva, 2021, en la figura 5 se registran los análisis térmicos de maguey y nopal, donde se aprecia la degradación térmica multietapa. El análisis termo gravimétrico (ATG) y de análisis térmico diferencial ATG-ATD en el intervalo de 50 °C a 100 °C se asocia a pérdida de peso debido a humedad en nopal 5% y para maguey 8%. El principal cambio asociado a pérdida de peso ocurre en el intervalo entre 250 °C y 350 °C para el nopal 54% y es menor para el maguey con 37% de pérdida en este intervalo de temperatura. Esta disminución de masa se ha asociado principalmente a degradación térmica de la celulosa. Los cambios termo gravimétricos observados entre 350 °C y 450 °C se han atribuido a la deshidratación de lignina, concluyendo que esta temperatura puede favorecer a las es producción del biocarbon.

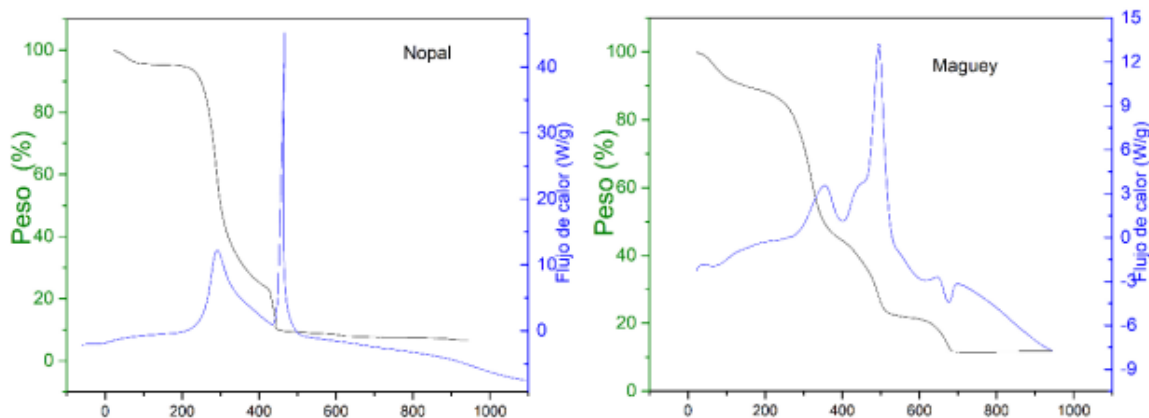


Figura 5. Termogramas y curvas ATD de las maderas de nopal y maguey. (Calva, 2021)

Los residuos fueron recolectados cerca del área del muestreo ya que ambas especies son utilizadas para las delimitaciones de caminos saca cosechas y linderos de ejidos (Figura 6)



Figura 6. Residuos orgánicos de maguey y nopal. Fuente propia

La biomasa fue limpiada y cortada en trozos con medidas cercas a los 3 cm, se dejó sacar en estufa a 80°C (Figura 7).



Figura 7. Biomasa de maguey y nopal. Fuente propia

7.3 Elaboración de biocarbón

La producción de biocarbon fue realizada en crisoles sellados con aluminio, posteriormente fueron llevados a un horno mufla en diferentes intervalos de temperatura con base al ATG de ambas materias primas, de acuerdo a pruebas

experimentales la temperatura que favorece la mezcla y producción es a 350° durante 1 hora. (Figura 8)



Figura 8. Biocarbon producido. Fuente propia

El artículo de revisión “Técnicas de producción de biocarbon que utilizan materiales derivados de residuos de biomasa y aplicaciones ambientales” describe que la pirólisis lenta aplicada a la biomasa nos brinda un rendimiento de aproximadamente el 35% como se aprecia en la Tabla 6. (Farah, 2022)

Técnica	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (s)	Calefacción velocidad (°C/s)	Biocarbón (%)
pirólisis lenta	300–550	horas a días 10–20s	1–10	35
pirólisis intermedia	450–550		10–1000	25
Pirólisis rápida	450–600	< 2 s	10–1000	12
Pirólisis flash	750–1000	0.5s	<1	–
Pirólisis asistida por microondas 400–800		–	>1000	–
Gasificación	> 800	10–20s	1–0.8	10
Torrefacción 450–550		< 2 h	–	75
Carbonización hidrotermal < 200		1–16 h	<1	35

Tabla 6. Condiciones de operación de los procesos de pirólisis y fraccionamiento de los subproductos (Farah, 2022)

Una muestra de 6 gramos de mezcla 50/50 de maguey y nopal a 350 °C durante una hora, alcanzo un rendimiento de 47%. Las temperaturas de pirólisis reducidas

y los tiempos de residencias prolongados dan como resultado mayor rendimiento (Figura 9)



Figura 9. Biocarbon producido experimentalmente. Fuente propia

7.4 Caracterización del biocarbón

La calidad del biocarbon está dada por la temperatura, tiempo y materia orgánica utilizada, en la tabla 7 se enlistan las propiedades fisicoquímicas obtenidas del biocarbón

Característica	Resultados
% de humedad	35.06 %
pH	9.54
Conductividad eléctrica	1830 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Densidad aparente	0.5197 g/ml
Cenizas	12%
Materia volátil	20.06%
Carbono fijo	32.86%

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas del biocarbon (Nopal/Maguey). Fuente propia

Representan la distribución de varios elementos presentes en la muestra del biocarbon obtenido. La concentración de carbono predomina en la muestra en relación con los demás elementos. (Tabla 8 y Figura 10)

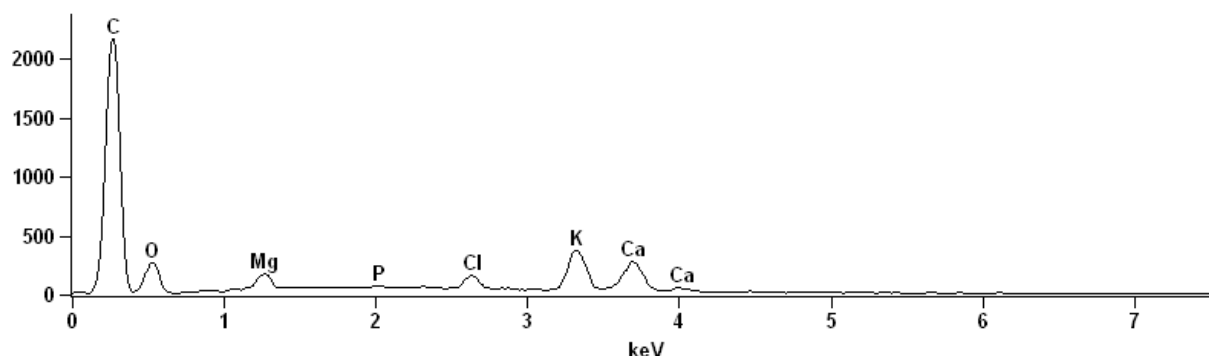


Figura 10. Concentración elemental del biocarbon. Fuente propia

<i>Element</i>	<i>Weight %</i>	<i>Atom %</i>
<i>Line</i>		
<i>O K</i>	61.75	78.33
<i>Mg K</i>	5.04	4.21
<i>P K</i>	0.92	0.60
<i>Cl K</i>	4.82	2.76
<i>K K</i>	14.83	7.70
<i>Ca K</i>	12.64	6.40
<i>Total</i>	100.00	100.00

Tabla 8. Composición elemental (% peso) del biocarbon. Fuente propia

La microcopia electrónica de barrido muestra variaciones en la estructura morfológica de la muestra, existe poca porosidad con partículas pequeñas amorfas. (Figura 11)

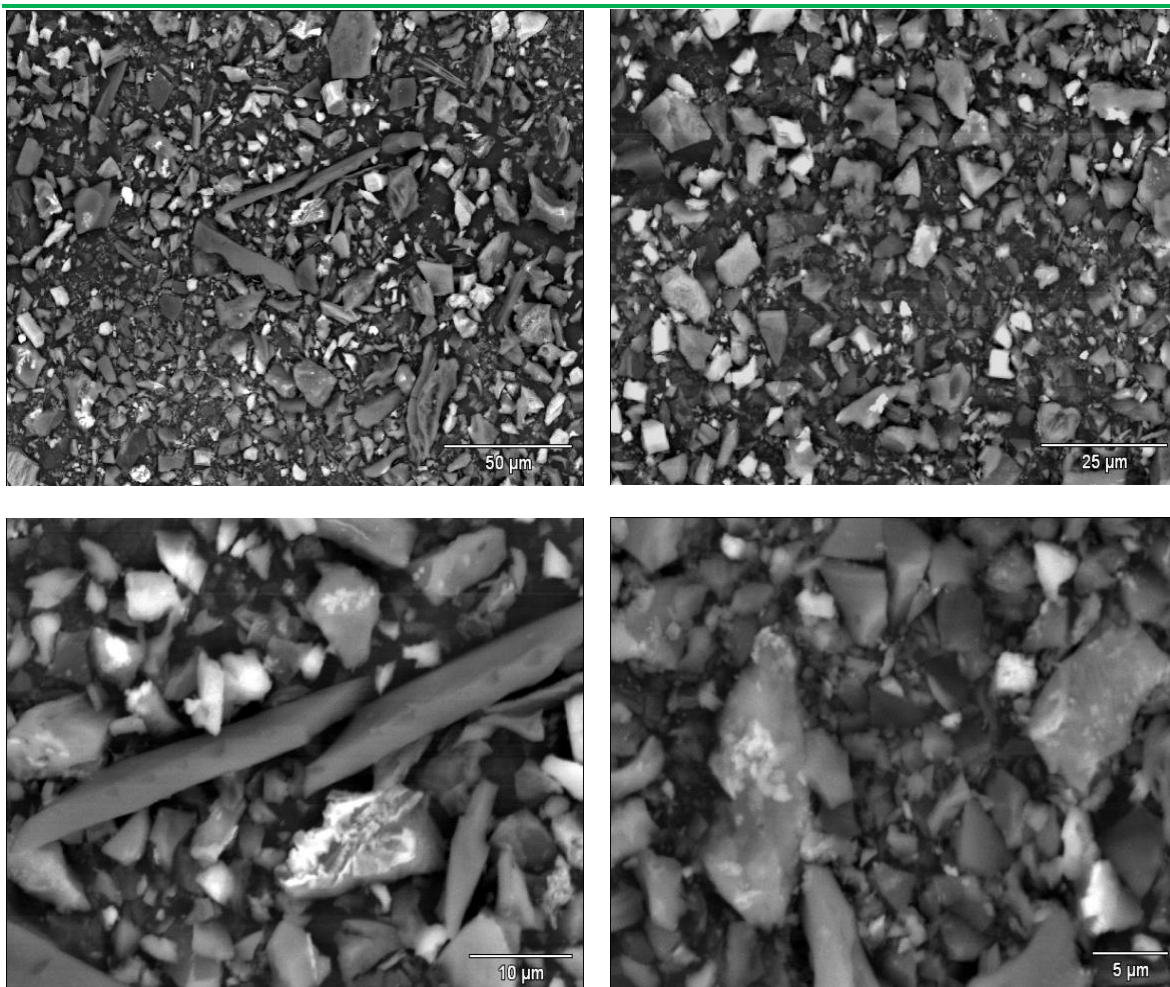


Figura 11. Microscopia de barrido del biocarbon. Fuente propia

7.5 Dosificación de biocarbón: diseño experimental

Con base a revisión bibliográfica se trabajaron tres concentraciones de la mezcla suelo/biocarbon, obteniendo los siguientes resultados en cuanto a monitoreo de crecimiento de la germinación y crecimiento inicial de semillas de avena forrajera, una especie comúnmente utilizada para cultivo de la región. (Tabla 9)

a) SUELO SIN BIOCARBÓN			
	TALLO	HOJA	RAIZ
M1	3.0 cm	15.0 cm	13.0 cm
M2	3.5 cm	12.5 cm	3.0 cm
M3	4.5 cm	16.5 cm	3.0 cm

b) SUELO 5 % DE BIOCARBÓN			
	TALLO	HOJA	RAIZ
M1	3.5 cm	11.5 cm	18.0 cm
M2	5.0 cm	17.0 cm	4.0 cm
M3	6.0 cm	15.0 cm	11.0 cm

c) SUELO 10% DE BIOCARBÓN			
	TALLO	HOJA	RAIZ
M1	3.0 cm	17.0 cm	12.0 cm
M2	3.0 cm	12.0 cm	12.0 cm
M3	4.5 cm	18.0 cm	7.5 cm

d) SUELO 15 % DE BIOCARBÓN			
	TALLO	HOJA	RAIZ
M1	4.5 cm	15.0 cm	19.0 cm
M2	3.5 cm	13.0 cm	12.0 cm
M3	4.0 cm	14.0 cm	13.0 cm

Tabla 9. Medidas de crecimiento de la planta en una semana con diferentes concentraciones de biocarbon. Fuente propia.

De los datos recopilados podemos observar un crecimiento mayor con respecto a la raíz de la planta, al aumentar la concentración se detectó que como se menciona en la bibliografía, el biocarbon obtenido brinda un beneficio mayor en cuanto a el crecimiento de raíz a comparación del tallo y la hoja. Figura 12



Figura 12. Pruebas de germinacion. Fuente propia

Al medir las plantas, a primera vista se aprecia la diferencia en cuanto al crecimiento de raíz como se aprecia en la figura 12

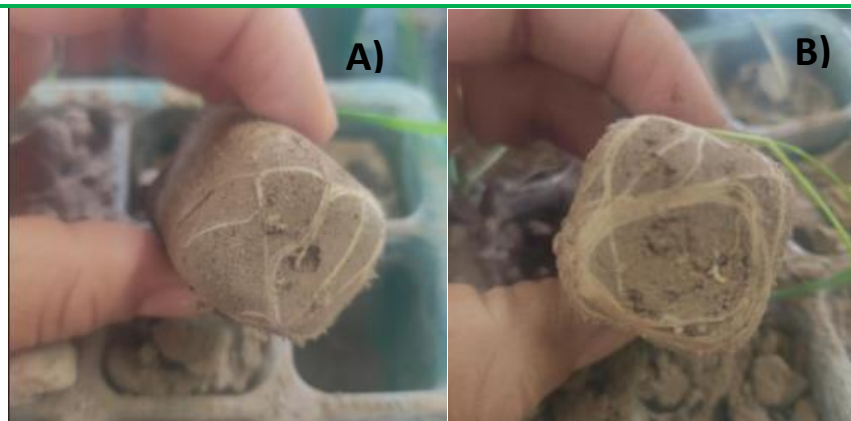


Figura 13. A) Crecimiento de la raíz sin biocarbon B) crecimiento de la raíz con biocarbon.
Fuente propia

8. Discusión

- El suelo utilizado para la investigación tiene propiedades fisicoquímicas aptas para cultivo, aun así es una región en erosión extrema que debe ser atendida.
- La biomasa utilizada como materia prima es accesibles y económica, de fácil tratamiento que no presenta dificultad para obtenerla.
- El biocarbon utilizado es una mezcla de 50/50 maguey y nopal, ambos son materiales leñosos, pero con diferente temperatura de termo degradación, lo que impide someterlos a temperaturas mayores de 350 °C, ya que el nopal pasa a materia inorgánica perdiendo efectividad.
- La microscopia muestra material con poca porosidad, los artículos consultados mencionan que esta característica es alcanzada a mayores temperaturas, pero la mezcla de la materia prima impide elevar la temperatura.
- Las pruebas de germinación demostraron favorecer más el crecimiento de la raíz a comparación del tallo.
- La variabilidad de concentraciones utilizadas de biocarbon mantienen constante el crecimiento de tallo y hoja.
- La tecnología incorporada ayuda amortiguar y prevenir el proceso de degradación de suelos

9. Conclusiones

El objetivo de la investigación está centrado en buscar tecnologías sustentables que brinden apoyo para la restauración de suelos del estado de México, ya que actualmente este estado cuenta con varios municipios vulnerables debido al uso de suelo y las bajas precipitaciones pluviales de dicha región. De acuerdo con los análisis, la naturaleza fisicoquímica del suelo de la región sigue siendo apta para los cultivos comunes como es el caso de maíz, avena y cebada.

La producción del biocarbon a base de residuos de maguey y nopal se obtuvo por pirolisis lenta a 350°C durante una hora. El biocarbon obtenido con base a pruebas de caracterización fisicoquímica es de buena calidad, pero tiene poca porosidad, dejando espacio para pruebas posteriores de tiempo y temperatura de ambos materiales utilizadas para la producción del mismo.

El biocarbon tiene efectividad en el rendimiento de cultivos incrementando el crecimiento de la raíz, sin embargo, aún se debe de trabajar en el monitoreo para la asimilación de nutrientes y en los efectos secundarios que pueda generar su adición al suelo, por lo que la aplicación de esta tecnología es rentable y eficiente para el tratamiento de suelos propensos a erosión extrema

10. Referencias

REFERENCIAS

- Alberto, E. C. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*, 221-228.
- Cabrera, C. A. (2021). Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 713-725.
- Calva, E. B. (2021). Maderas de zonas áridas de México, poder calorífico por ATG-ATD y mediante bomba calorimétrica. *Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C*, 1-12.
- Dengyu, C. (2022). Información de los mecanismos de pirólisis de biomasa basado en celulosa, hemicelulosa y lignina. *Combustion y Llama*, 112-142.
- Farah, A. (2022). Técnicas de producción de biocarbon que utilizan materiales derivados de residuos de biomasa y aplicaciones ambientales. *Revista d avances en materiales peligrosos* , 100-134.
- González, M. A. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el. *Terra Latinoamericana*, 271-288.
- INEGI. (2019). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/default.html>
- Initiative, I. B. (2014). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*.
- J, V. M. (2019). Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista Fitotecnia México*, 129-136.
- Machuca, M. A. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*, 243-251.
- Malaquías, I. S. (2020). *Repositorio institucional UAEM* . Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/110689>
- Molin, L. D. (2016). La desertificación del suelo, aspectos y estrategias de lucha . *Revista especializada en ingeniería* , 116-127.
- Municipal, P. d. (2016). *Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa*. Obtenido de Plan de Desarrollo Municipal Temascalapa:

https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/47/11/3179c8536ed979a30530e17d1811d47f.pdf

- Orozco, L. E. (2018). Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 121-129. .
- Orozco-Gutierrez, G. y.-F. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos provenientes de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). . *Rev. Mex. Agroecosistemas*, 1-9.
- Rebolledo, A. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 367-382.
- Rodríguez, L. M. (2020). *VULNERABILIDAD AGRÍCOLA POR SEQUÍA: PROPUESTA Y VALIDACIÓN METODOLÓGICA PARA EL ESTADO DE MÉXICO*. Mexico: Papeles de Geografía. Obtenido de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/409401>
- Santos, A. L. (2016). Neutralizar la degradación de tierras, una aspiración global.¿Es posible lograrlo en México? . *Terra Latinoamericana*, 239-249.
- Silva, I. C. (2017). Growth and production of common bean fertilized with biochar. *Ciência Rural*, 1.8.
- Temascalapa, P. d. (2016). Obtenido de https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2016/47/11/3179c8536ed979a30530e17d1811d47f.pdf
- Xiao, F. (2022). Una revisión del biocarbón funcionalizado por la oxidación térmica del aire. . *Materiales funcionales ambientales* , 185-196.
- Xu, C. Y. (2015). Peanut shell biochar improves soil properties and peanut kernel quality on a red Ferrosol. *Soils and Sediments*., 2220-2231.