



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CARBÓN VEGETAL COMO MEJORADOR DE UN ACRISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR

MARIBEL HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

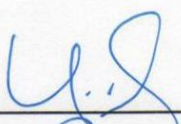
MAESTRA EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2015

La presente tesis titulada: **Carbón vegetal como mejorador de un Acrisol cultivado con caña de azúcar**, realizada por la alumna: Maribel Hernández Hernández, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO
CONSEJO PARTICULAR

Consejero: 

Dr. David Jesús Palma López

Asesor: 


Dr. Sergio Salgado García

Asesor: 

Dr. Joaquín Alberto Rincón Ramírez

Asesor: 

Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno

Asesor: 

Dr. Heriberto E. Cuanalo de la Cerda

Cárdenas, Tabasco, México, 10 de Junio, 2015

RESUMEN

CARBON VEGETAL COMO MEJORADOR DE UN ACRISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZUCAR

Maribel Hernández Hernández

Colegio de Postgraduados, 2015

Palabras claves: Residuo de carbón vegetal, Terra Preta, Carbón, biochar, propiedades físicas y químicas.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de analizar el efecto de la adición de residuos de carbón vegetal sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar. El suelo se colectó de 0 a 20 cm de profundidad en el área cañera de la sabana de Huimanguillo, Tabasco. Se utilizaron residuos de carbón vegetal no comercializable, proveniente de la empresa “El Cocoite”, de Villahermosa Tabasco. La materia prima utilizada en la producción del carbón, proviene de diferentes especies como *Guazuma umlifolia* (Guácimo), *Spondias mombin* L. (Jobo), y *Pidió guajava* (Guayabo), subproductos de la poda de los campos ganaderos y agrícolas. El carbón es producido de manera artesanal a una temperatura máxima de 375C°. Al carbón se le determinó: pH, Conductividad eléctrica (CE), Nitrógeno total (Nt), Carbono orgánico (CO), fósforo extraíble (P), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (Da), bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} Na^{+} y K^{+}), acidez intercambiable y macroporosidad. Se mezclaron: 0, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, 4.2 y 4.8 g de carbón mezclado con 300 g de suelo seco, estos tratamientos corresponden a 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 t ha⁻¹ de residuo de carbón vegetal. Las mezclas de suelo y carbón se incubaron a oscuras a temperatura ambiente entre 25 y 30 °C con un contenido de humedad equivalente al 80% de la capacidad de campo (CC), durante un periodo de tres meses; realizándose dos muestreos, uno a los 45 días y otro a los 90 días. Antes de la incubación y para cada muestreo se determinaron los parámetros físicos y químicos: Da; CE, pH (H₂O), pH (KCl), materia orgánica (MO), CO, Nt, relación C/N, P extraíble, K, Ca, Mg, Na, aluminio y acidez intercambiables, así como la CIC. Se concluye que la aplicación de residuos de carbón vegetal al suelo Acrisol Ferrico aumentó la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP) mejorando la Da. También aumentó el pH (H₂O), pH (KCl), M.O, CIC y las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} Na^{+} y K^{+}), disminuyó la acidez intercambiable

y el aluminio intercambiable. Los resultados obtenidos indican que el carbón adicionado mejoró la fertilidad del Acrisol Férreo (Arcílico, Cutánico), con excepción de la concentración de fósforo extractable que mostró una disminución.

ABSTRACT

CHARCOAL AS IMPROVEMENT OF A ACRISOL CULTIVATED WITH SUGAR CANE

The present work was conducted to analyze the effect of the addition of charcoal residues on physical and chemical soil Acrisol cultivated with sugar cane properties. The soil was collected from 0-20 cm depth in the sugar cane area Savannah Huimanguillo, Tabasco. Unmarketable waste charcoal were used, from the company "The Cocoite" Villahermosa Tabasco. The raw material used in the production of coal comes from different species as *Guazuma umlifolia* (Guacimo) *Spondias mombin* L. (Jobo) and requested *guajava* (Guava), pruning by products of livestock and agricultural fields. Coal is produced by craftsmen at a maximum temperature of 375°C. Coal will be determined: pH, electrical conductivity (EC), nitrogen total (Nt), organic carbon (OC), extractable phosphorus (P), cation exchange capacity (CEC), bulk density (Da), exchangeable bases (Ca^{2+} Mg^{2+} Na^{+} and K^{+}), exchangeable acidity and macroporosity. were mixed: 0, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, 4.2 and 4.8 g of coal mixed with 300 g of dry soil, these treatments correspond to 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 t ha⁻¹ charcoal residue. Mixtures of ground coal and incubated in the dark at room temperature between 25 and 30 ° C with a moisture content equivalent to 80% of field capacity (CC) for a three month period; two samplings performed one after 45 days and another 90 days. Before incubation and for each sample the physical and chemical parameters were determined: Da; EC, pH (H₂O), pH (KCl), organic matter (OM), CO, Nt, C/N, extractable P, K, Ca, Mg, Na, aluminum and interchangeable acidity and CIC. It is concluded that the application of waste ground charcoal Acrisol Ferric increased field capacity (CC) and permanent wilting point (PMP) improving Da. Also increased the pH (H₂O), pH (KCl), MO, CIC and exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} Na^{+} and K^{+}), decreased exchangeable acidity and exchangeable aluminum. The results indicate that the added coal Acrisol improved fertility Ferric (Arcilico, Cutanico), except for the concentration of extractable phosphorus showed a decrease.

Keywords: Charcoal residue, Terra Preta, charcoal, biochar, physical and chemical properties.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, por participar en mi formación académica y por el apoyo brindado durante estos dos años.

A don Elizandro por medio de la Empresa Carbonera el Cocoite por facilitarnos el material e información de las carboneras para poder desarrollar este trabajo de investigación.

Al Dr. David Jesús Palma López por su comprensión y apoyo en mi formación académica, por sus enseñanzas y por las oportunidades inagotables brindadas, me deja lecciones de vida. Por su magnífica orientación en los cursos de la Maestría así como el desarrollo del trabajo de investigación en campo y por su amistad. Pero sobre todo por la infinita paciencia para conmigo y mis problemas.

Al Dr. Sergio Salgado por su asesoría y apoyo cada vez que lo necesitaba en el transcurso de mi maestría.

Al Dr. Joaquín A. Rincón por estar al pendiente que todo estuviera en orden y por ser miembro del consejo particular, por sus acertadas sugerencias.

A la Dra. Claudia I. Hidalgo por su apoyo incondicional durante la estancia realizada en el Colpos Montecillo, así mismo por su infinita paciencia y enseñanza en el laboratorio. De igual manera por contribuir en mi formación profesional y su disponibilidad de tiempo a pesar de la distancia.

Al Dr. Heriberto Cuanalo de la Cerda, por su apoyo brindado, siempre con la disponibilidad de tiempo a pesar de la distancia y por los sabios consejos que me brindo por contribuir en mi trabajo de investigación.

Al Dr. Armando Guerrero por el apoyo brindado durante mi estancia en el laboratorio de LASPA.

A don Esteban por brindarme su apoyo incondicional y enseñanza durante mi estancia en el laboratorio de LASPA.

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la oportunidad de culminar una meta más en mi vida, y por las bendiciones que han llegado a mi persona. Por ser la guía e iluminación en los momentos más difíciles que he pasado y que nunca me ha desamparado.

Queridos padres: Victoria y Norberto, gracias por todo su apoyo que me han brindado en el transcurso de mi vida y por la paciencia que siempre tienen, en las decisiones que he tomado para superarme día con día. Gracias por ser los mejores padres.

A ti querida madre por tu apoyo incondicional en los momentos más difíciles que he pasado, por tus consejos y bendiciones que me has dado cada día. Gracias por ser la mejor madre y la mejor abuela de mis angelitos.

Queridos hermanos: Lucio por ser el que me enseñó a luchar con actitud y perseverancia, Rigo por ser el ángel que me cuida y Leyver por permitirme disfrutar de un hermano pequeño y enseñarme que en la vida todo tiene solución.

Queridas Hermanas: Chusi por darme el ejemplo a desarrollarme profesionalmente, Eulogia por estar cuidando y protegiendo siempre, que nada me pase a pesar de ser mi hermana pequeña, Mayola por enseñarme a defender con valentía a una familia y por tu motivación de seguir adelante cada día. Gracias por sus apoyo incondicional.

A ti querido esposo: gracias por tus consejos y sugerencias que has compartido conmigo. Por tu amor incondicional, por querer siempre el bien para mí y por apoyarme, en esta etapa de mi vida. Dios te bendiga, siempre.

Mis queridos hijos. Mis pequeños Cristian y Leonardo, por ser ustedes mi inspiración a seguir con mis sueños para ser una madre ejemplar y por darme tanta felicidad.

A todas mis amigas Eva, Miriam, Viki, Irma por su motivación, ayuda en mi estancia en la maestría por compartir cada vivencia juntas. A cada uno de mis compañeras (o) de la generación primavera 2013 y para la generación otoño 2013 Ernesto Sofía y José por su amistad brindadas.

CONTENIDO

I. INTRODUCCION.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
III. HIPÓTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. Definición de suelo.....	4
4.2. Suelo Acrisol	5
4.2.1. Acrisoles Férricos	5
4.3. La materia orgánica del suelo.....	5
4.4. Antecedentes de la <i>Terra Preta</i>	6
4.5. Biochar	8
4.5.1. Definición del biochar	8
4.5.2. Efecto de la temperatura y del material utilizado para la elaboración de biochar	9
4.5.3. Características del biochar	10
4.5.4. Efecto de la aplicación de biochar al suelo.....	11
4.6. Carbón Mineral	12
4.7. Carbón vegetal.....	12
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
5.1. Suelo Utilizado.....	14
5.2. Características de los residuos de carbón vegetal empleados	14
5.3. Determinación de las propiedades químicas y físicas del residuo de carbón.....	15
5.4. Preparación del suelo para su posterior incubación	16
5.5. Experimento de incubación	17
5.6. Análisis del suelo después de la incubación.....	17
5.7. Análisis estadísticos	17
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
6.1. Características físicas y químicas del suelo Acrisol utilizado.....	19
6.2. Caracterización del residuo de carbón vegetal	20

6.3. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre las propiedades físicas del suelo después de la incubación.	24
6.4. Efecto del residuo de carbón vegetal en el pH del suelo.....	27
6.5. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre su reacción (pH) en KCl del suelo	27
6.6. Efecto del residuo de carbón vegetal en la Conductividad eléctrica (CE) del suelo.....	28
6.7. Efecto del residuo del residuo de carbón vegetal en la MO del suelo	29
6.8. Efecto del residuo del residuo del carbón vegetal en el carbono orgánico (CO) del suelo	30
6.9. Efecto del residuo de carbón vegetal en el nitrógeno total (Nt) del suelo	31
6.10. Efecto del residuo de carbón vegetal en la relación C/N del suelo	31
6.11. Efecto del residuo de carbón vegetal en el fósforo extractable de la combinación o mezcla del suelo con residuos de carbón del suelo	33
6.12. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre la acidez intercambiable y aluminio intercambiable del suelo.....	33
6.13. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre las bases intercambiables del suelo	35
6.14. Efecto del residuo de carbón vegetal en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo.....	37
VII. CONCLUSIONES.....	39
VIII. LITERATURA CITADA	40
IX. ANEXOS.....	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Metodología de la NOM-021-RECNAT-2000 empleadas para la caracterización del suelo.....	14
Cuadro 2.Descripcion del perfil de suelo Acrisol Férrico (ACfr) utilizado para el experimento.	19
Cuadro 3.Propiedades físicas y químicas del suelo ACfr a los 20 cm.....	20
Cuadro 4. Temperatura promedio durante el proceso de producción del carbón vegetal.....	21
Cuadro 5. Características físicas y químicas del residuo del carbón vegetal.....	22
Cuadro 6. Capacidad de campo (CC %) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	25
Cuadro 7. Punto de marchites permanente (PMP) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	25
Cuadro 8. Humedad aprovechable (HA %) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	26
Cuadro 9. Densidad aparente D_a (g cm^{-3}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	26
Cuadro 10.Valor de pH en agua del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	28
Cuadro 11. Valor de pH en KCL del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	28
Cuadro 12. Conductividad eléctrica (CE dS m^{-1}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	29
Cuadro 13. Materia orgánica del suelo (MO %) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	30
Cuadro 14. Carbono orgánico (CO) del suelo (%) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	32
Cuadro 15 Nitrógeno total (Nt %) del suelo con diferentes dosis de residuos de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	32
Cuadro 16. Relación C/N del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.....	32

Cuadro 17. Fósforo extractable (mg kg^{-1}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	33
Cuadro 18. Acidez intercambiable (cmol (+) kg^{-1}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	34
Cuadro 19. Aluminio intercambiable (cmol (+) kg^{-1}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	34
Cuadro 20. Calcio intercambiable del suelo (cmol (+) kg^{-1}) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	36
Cuadro 21. Magnesio intercambiable del suelo (cmol (+) kg^{-1}) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	36
Cuadro 22. Sodio intercambiable del suelo (cmol (+) kg^{-1}) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	36
Cuadro 23. Potasio intercambiable del suelo (cmol (+) kg^{-1}) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	37
Cuadro 24. Capacidad de intercambio de cationes del suelo (cmol (+) kg^{-1}) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de los perfiles de suelos Antrosol y Oxisol de la amazonia: a) Terra preta mejorado con adiciones continuas de carbón y restos orgánicos, y b) evolución natural del oxisol.	8
Figura 2. Materiales empleados para la incubación de la mezcla de suelo carbón vegetal a) residuo de carbón vegetal tamizado. b) mezcla suelo con carbón, c) homogenización de la muestra, d) Vasos en que se estableció el experimento.....	16
Figura 3. Distribución de los tratamientos con vasos de colores para diferenciar cada uno de ellos	17
Figura 4. Apariencia del suelo con carbón vegetal después de los 90 días de incubación	18
Figura 5. Vista microscópica en microscopía electrónica de barrido (MEB) del residuos de carbón vegetal a) partícula grande (vista general), b) detalle de la porosidad de partícula grande, c) vista de partícula más pequeña, d) detalle de poros de partícula más pequeña, e) partícula grande(vista transversal, f) vista alargada de la misma partícula Microscopía electrónica de barrido)	23
Figura 6. Imágenes SEM de biochars de (a) aserrín, (b) cascara de arroz) y (c) hojas de palma tomado por Mankasingh et al. (2011).....	24

I. INTRODUCCION

En la Sabana de Huimanguillo Tabasco desde hace unos 4 años se establecieron plantaciones de caña de azúcar, en suelos Acrisoles, que a pesar de haber recibido 2 t ha^{-1} de cal agrícola, presentan rendimientos bajos ($<50 \text{ t ha}^{-1}$). Estos suelos presentan problemas de alta fijación de fósforo, deficiencias de Zn, bajas tasas de formación de NH_4^+ y NO_3^- , bajos contenidos de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ , y un alto porcentaje de saturación de aluminio intercambiable (Palma-López *et al.*, 2007). Los mismos autores mencionan que estos suelos se caracterizan por ser muy intemperados, lixiviados y ácidos. En general el color permite identificarlos fácilmente, ya que varían de colores oscuros sobre amarillentos a rojizos. Se han clasificado dentro de cinco subunidades: Acrisoles Húmicos, A. Plínticos, A. Gléyicos, A. Férricos, y A. Haplicos (Palma-López *et al.*, 2007). Por lo que se necesita contar con información que permita mejorar la fertilidad de estos suelos cultivados con caña de azúcar, sobre todo propuestas que incorporen enmiendas orgánicas con el fin de realizar un manejo más sustentable de los mismos. Una de estas enmiendas que no se han probado en la región es el uso de residuos de carbón vegetal, del cual se tienen estudios en el Amazonas en Brasil, donde se han detectado partículas similares al carbón en suelos con excelentes indicadores de fertilidad (Lehmann *et al.* 2006); Lehmann y Joseph, 2009). Los suelos donde se encontró carbón, se caracterizan por poseer grandes cantidades de materia orgánica con alta estabilidad, altos niveles de nutrientes y altos contenidos en carbono (Glaser *et al.*, 2001; Glaser, 2007)

En México el carbón vegetal es una de las fuentes de combustible fundamentales para el uso doméstico (Serrano-Mandrano *et al.*, 2014). Este combustible se produce por carbonización de biomasa de diferentes especies maderables por medio de pirolisis (Chidumayo y Gumbo, 2013). Al respecto, Glaser (2007) menciona que estos residuos de carbón vegetal se pueden utilizar como enmiendas del suelo por ello es necesario buscar alternativas para aprovechar este subproducto en los suelos degradados del estado de Tabasco.

En las carboneras del estado de Tabasco manejan condiciones rústicas en la producción de carbón vegetal, lo que provoca que se tengan residuos de carbón vegetal de tamaño muy pequeño, por lo que no son comercializables debido a la exigencia del mercado, una gran cantidad de este residuo acaba contaminado el ambiente en las zonas rurales y urbanas, por lo tanto es necesario buscar alternativas para aprovechar este subproducto.

Partiendo de lo anteriormente expuesto, en este estudio se planteó estudiar el efecto de la adición de residuos de carbón vegetal a un suelo Acrisol, cultivado con caña de azúcar, bajo condiciones controladas sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar el efecto de la adición de residuos de carbón vegetal en las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar.

2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las características físicas y químicas del carbón vegetal y de un suelo Acrisol.
2. Evaluar el efecto de los residuos de carbón vegetal sobre las propiedades físicas y química de un suelo Acrisol.

III. HIPÓTESIS

El carbón vegetal tiene propiedades físicas y químicas que permiten mejorar la baja fertilidad de los Acrisoles.

La adición de residuos de carbón vegetal mejora las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Definición de suelo

El suelo es uno de los recursos naturales de mayor significado para el hombre, se le considera como el medio natural para el desarrollo de las plantas terrestres y se le caracteriza por ser el resultado de la acción de un conjunto de factores de formadores como son el clima, material madre, vegetación, organismos, topografía y tiempo (Ortiz-Solorio, 1992).

El suelo es un cuerpo natural que se encuentra en la superficie de la tierra es dinámico (Porta *et al.*, 2008), los mismos autores mencionan que el suelo permite el enraizamiento de las plantas, con lo que estas pueden obtener oxígeno y nutrientes. El suelo es un medio para el desarrollo de plantas terrestres el cual está formado por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que ocupa un espacio (Soil Survey Staff, 2010), otros autores como Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio (1980), definen el suelo como un cuerpo natural, creado por fuerzas naturales que actúan sobre materias naturales, en un sentido más amplio se le ha considerado como una mezcla de materiales minerales, materia orgánica, agua y aire. Generalmente se dividen en niveles de elementos minerales y orgánicos de profundidad variable, que difiere del material original que hay debajo de ellos, en morfología, propiedades, composición química y características biológicas. Ortiz-Solorio y Cuanalo (1981), mencionan que el suelo se encuentra sobre la superficie de la corteza terrestre, soportando o siendo capaz de soportar plantas.

Los suelos constituyen el medio natural en donde se desarrolla la vegetación y los cultivos agrícolas en ellos se descomponen los residuos orgánicos y se reciclan los nutrimentos, también son reguladores de la calidad del agua y del aire, pues funcionan como un reactor: filtrando, amortiguando y transformando compuestos, entre ellos, los contaminantes; así mismo, representan el hábitat de muchos organismos; es fuente de materiales diversos que sobre él se construyen como las casas habitación y está influenciado por el desarrollo industrial, sistemas de transporte, recreación, etc. Se considera como la base de la estructura socioeconómica. Es importante mencionar que el suelo es fuente de materiales como arcilla, arena, grava y minerales, además el suelo contiene la historia de la tierra y de las culturas antiguas y ha sido fuente de inspiración poética, pictórica, musical, estética y religiosa (Bautista *et al.*, 2005).

4.2. Suelo Acrisol

Son suelos que tienen un horizonte B árgico con una Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) menor a $24 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$ de arcilla y una saturación de bases menor al 50 %, en al menos alguna parte del horizonte B dentro de los primeros 125cm,este grupo de suelos presenta característica que lo identifican fácilmente, como son: horizontes de colores oscuros sobre amarillentos a rojizos, fuerte acidez sobre todo en el horizonte B, la presencia de un horizonte B, acumulación aluvial de arcilla, altas concentraciones de hierro y aluminio en forma de sesquióxidos, alta fijación de fósforo y propensión a la erosión debido a situarse en lomeríos con pendientes variables, en el estado de Tabasco se identifican cinco subunidades: los Acrisoles Húmicos, los Acrisoles Plínticos, los Acrisoles Gléyicos, los Acrisoles Férricos y los Acrisoles Háplicos (Palma-López *et al.*, 2007).

4.2.1. Acrisoles Férricos

Son los Acrisoles que no son fuertemente húmicos, presentan propiedades férricas a menos de 125 cm de profundidad; por su fisiografía ocupan lomeríos con pendientes convexas pronunciadas entre 5-20%, el material parental de estos suelos son sedimentos aluviales antiguos del Pleistoceno, así como materiales residuales de areniscas del Terciario, son suelos profundos en los horizontes A de textura medias, no presenta la acumulación de materia orgánica propia de los horizontes úmbricos o mólicos, además el horizonte B árgico presenta una buena cantidad de arcilla iluvial, siendo de colores rojizos en casi todo su perfil, el pH varia de fuerte a muy fuertemente ácido, son suelos con bajos contenidos de nutrimentos y alta fijación de fósforo por hierro y aluminio (Palma-López *et al.*, 2007)

4.3. La materia orgánica del suelo

La materia orgánica está formada por una serie de componentes que van desde tejidos vegetales y animales poco alterados y productos efímeros procedentes de su descomposición, hasta un material de color pardo o negro, bastante estable, que no presenta semejanza alguna con las estructuras anatómicas de las que procede. La totalidad de sustancias orgánicas presentes en el suelo incluyen también organismos vivos (biomasa del suelo), aunque éstos normalmente no representan más del 5% de la materia orgánica total (Thompson y Troech., 1988). Por su papel central en el establecimiento de la fertilidad (física, química y biológica) del suelo, la materia orgánica es

considerada de vital importancia en la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas a largo plazo y, desde el punto de vista ambiental, es la encargada de la captura de carbono y la biodiversidad edáfica (Carter, 2002).

En los procesos que se realizan para la descomposición de la materia orgánica del suelo se distinguen dos fases: la humificación y la mineralización. En la primera se forma el humus joven, de evolución rápida, que a su vez da paso al humus estable, ambos productos forman la materia orgánica total del suelo. El humus joven también se le llama “lábil” o “libre”, porque todavía no está fijado o ligado a las partículas del suelo, sino simplemente mezclado con ellas, tiene una relación C/N superior a 15, es sede de una intensa actividad microbiana y se le puede considerar como un elemento fundamental de la fertilidad del suelo. En promedio se estima que representa del 20-25% del humus total y tiene una acción inmediata más importante, desde el punto de vista de la mejora de la estructura de la actividad microbiana del suelo. El humus estable o “estabilizado” es la materia orgánica ligada al suelo, es decir sólidamente fijada a los agregados de color oscuro, su composición es muy compleja (humina, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, entre otros), tienen una relación C/N constante entre 9 y 10, y representa en promedio el 75%-80% del humus total. La fase de mineralización es muy lenta, y en ella el humus estable recibe la acción de otros microorganismos que lo destruyen progresivamente (1 a 2% al año), liberando así los minerales esenciales para las plantas. Esta fase presenta dos etapas pero este material, sobre todo favorece procesos que se relacionan con el incremento de la fertilidad física del suelo, (Navarro *et al.*, 1995; Julca-Otiniano *et al.*, 2006).

4.4. Antecedentes de la *Terra Preta*

Se trata de las tierras oscuras amazónicas que aparecen en parches de suelos arqueológicos, estos suelos presentan una capa gruesa de color oscuro y son conocidos como antropogénicas (formadas por el hombre), se les llama también Tierras oscuras, *Terra Preta do Indio* (tierra negra de indio) o *Terra Preta* de la Amazonia (Glaser *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2002; Glaser, 2007). Se tiene antecedentes que en la *Terra Preta* se han detectado partículas similares al carbón, estos suelos por lo general se identifican por el color negro de su perfil edáfico y también porque presentan excelentes propiedades, entre las que se pueden mencionar su elevado contenido de materia orgánica y carbono, una elevada disponibilidad nutrimental, altos contenidos de humedad, buena

capacidad de intercambio catiónico y buena actividad microbiana (Lima *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2003).

Terra Preta es abundante en nutrientes ya que no sólo contienen concentraciones altas de nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, sino también buenas cantidades de materia orgánica estable (Glaser *et al.*, 2001). Es evidente que la abundancia de nutrientes totales, no solo implicó la adición de compuestos orgánicos carbonizados, sino también productos de diferentes orígenes como: cenizas, huesos, esqueletos de pescados, residuos de biomasa, estiércol, excrementos, orina y biochar (Glaser *et al.*, 2001; Glaser, 2007; Glaser y Birk, 2012).

Una de las teorías es que estos suelos se formaron por asentamientos humanos indígenas de poblaciones nativas precolombinas (Glaser, 2007). Al respecto Glaser *et al.* (2001), y Lehmann (2009) dicen que la *Terra Preta*, fue encontrada en sitios donde vivieron importantes poblaciones precolombinas y que este suelo tiene efecto marcado y directo sobre las plantas, resultado de cientos de años de formación y evolución generando suelos ricos en materia orgánica, nutrientes y microorganismos; estos suelos se fueron formando a través del tiempo por medio de diversas acciones tales como el aporte de desechos orgánicos (Schmidt *et al.*, 2014).

Glaser *et al.* (2001), mencionan que las tierras negras de los indios amazónicos, tienen altas concentraciones de carbono orgánico y partículas de carbón vegetal y son completamente diferentes a los suelos de su entorno que normalmente son Oxisoles (Figura 1). Otros autores como Lehmann *et al.* (2003) y Schmidt *et al.* (2014), mencionan que contienen una gran proporción de carbón pirogenético y que estos provinieron principalmente del carbón de cocina y restos de incendios. Todavía no está claro si la *Terra Preta* fue producida intencionalmente añadiendo residuos carbonizados (carbón vegetal) (Glaser, 2007) y tampoco de cuánto tiempo se necesitaba después de la adición de los materiales antes mencionados, para desarrollar este suelo (Glaser y Birk, 2012.).



Figura 1. Comparación de los perfiles de suelos Antrosol y Oxisol de la amazonia: a) Terra preta mejorado con adiciones continuas de carbón y restos orgánicos, y b) evolución natural del oxisol.

4.5. Biochar

4.5.1. Definición del biochar

Biochar es el producto de la degradación térmica de los materiales orgánicos en ausencia limitada de aire (pirólisis), es rico en carbono obtenido cuando la biomasa, tal como madera, estiércol y hojas, se calienta en un recipiente cerrado recipiente con poco o nada de aire disponible, en términos más técnicos, el biochar es producido por descomposición térmica del material orgánico bajo suministro limitado de oxígeno (O_2), y a temperaturas relativamente bajas $< 700 \text{ }^\circ \text{C}$ (Lehmann y José., 2009; Peng *et al.*, 2011; Karhu *et al.*, 2011). Estos mismos autores proponen en su definición la particularidad de denominar al material pirólizado como biochar cuando su destino es la de aplicarlo como enmienda orgánica de suelos y para el secuestro de carbono en el mismo por su poder recalcitrante (Amonette., 2009) siendo estos últimos aspectos de gran importancia, ya que se descarta el uso de biochar como combustible. El proceso de producción y el uso previsto, constituye la base para distinguir al biochar (Lehmann *et al.*, 2006). Los mismos autores mencionan que el biochar es el término apropiado en caso de aplicación de materia orgánica carbonizada al suelo de una manera deliberada, con la intención de mejorar las propiedades del suelo esto distingue el biochar del carbón que se utiliza como combustible para el calor, como un filtro, como un reductor en la toma de hierro o como un agente colorante en la industria o el arte.

4.5.2. Efecto de la temperatura y del material utilizado para la elaboración de biochar

La temperatura y el material parental son dos factores que rigen las propiedades del biochar, ya que al aumento de temperaturas de pirolisis dará lugar al aumento del área superficial del biochar, aumento en el pH, y se incrementa concentración de carbono (C), sin embargo presenta una disminución tanto en cargas superficiales, hidrógeno (H) y oxígeno (O). Temperaturas de pirolisis altas causan la pérdida de los compuestos volátiles (Novak *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2011). Por ejemplo, el carbón vegetal producido a partir de residuos de trigo entre 500-700 ° C está bien carbonizado y su área superficial era relativamente alta ($> 300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), mientras los que están bien formados en 300-400 ° C fueron parcialmente carbonizado y tenían una superficie inferior ($< 200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) (Chun *et al.*, 2004). Biochars derivados de diversos materiales muestran propiedades diferentes. Luo *et al.* (2011) estudiaron las propiedades del carbón de paja de arroz, hollín y cenizas (carbono negro) y encontraron que el área de superficie ($234.9 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), la porosidad (0.4392 ml g^{-1}) y una mayor cantidad de grupos funcional ($2.995 \text{ mmol g}^{-1}$). Otros trabajos muestran el impacto de materiales parentales y las temperaturas en la porosidad, la superficie y la capacidad de adsorción del biochar (Chen *et al.*, 2008; Uchimiya *et al.*, 2011). En otro el trabajo realizado por Al-Wabel *et al.* (2013), con desechos de *Conocarpus* pirolizado a diferentes temperaturas (200-800 ° C) encontraron que a temperatura de pirolisis más elevada, el contenido de cenizas, pH, conductividad eléctrica, grupos funcionales básicos, la estabilidad de carbono y el contenido total de C, N, P, K, Ca y Mg aumentaron, mientras que el rendimiento de biochar, el contenido total de O, H, S, C orgánico de forma inestable y los grupos funcionales ácidos disminuyeron. Las proporciones de O/C, H/C, (O+N)/C, y (O+N+S)/C tendieron a disminuir con la temperatura. Los datos de la transformada de Fourier de infrarrojos indican un aumento en la aromaticidad y una disminución de la polaridad del biochar producido a una temperatura alta, los autores sugieren que el biochar pirolizado a alta temperatura puede poseer un mayor potencial de secuestro de carbono cuando se aplica al suelo en comparación con la obtenida a baja temperatura. Es importante mencionar que la pirolisis es el resultados de la biomasa en la producción de un material sólido con un alto contenido de carbono llamado biochar y esto hace que el biochar sea prometedor para usarlo como una enmienda del suelo que captura carbono para combatir el cambio climático (Sohi *et al.*, 2010) o un adsorbente químico (Chun *et al.*, 2004).

4.5.3. Características del biochar

La composición química del biochar es similar al carbón vegetal producido para combustible y lo único que los distingue es el objetivo para el cual fueron preparados (Schahczenski, 2010), además, es altamente recalcitrante a la descomposición microbiana y por lo tanto garantiza un beneficio a largo plazo para la fertilidad del suelo (Steiner *et al.*, 2007).

Cada partícula de biochar consiste de dos fracciones principales: laminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, que están caracterizadas por enlaces de carbonos en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno o hidrogeno (Lehmann y Joseph, 2009). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del biochar y son usados para medir su grado de aromaticidad (Hammes *et al.*, 2008). También tienen estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables, esta estructura química y los componentes orgánicos que conforman la biomasa original directamente influyen las propiedades físicas y químicas del biochar formado, las cuales a su vez definen los efectos benéficos del biochar y su tiempo de residencia en el suelo (Schmidt y Noack., 2000; Lehmann, 2007). En comparación con otras enmiendas del suelo, su alta área superficial y porosidad le permiten adsorber o retener nutrientes y agua, también proporcionan un hábitat para los microorganismos (Glaser *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2006; Warnock *et al.*, 2007).

Otro aspecto importante de su composición es su contenido tan elevado de carbono, que al entrar con el suelo, elevaría la relación C: N (Novak *et al.*, 2010). La oxidación del biochar forma grupos carboxílicos sobre los puentes de los núcleos aromáticos, que son responsables del incremento de la CIC y la reactividad del biochar en el suelo (Lian *et al.*, (2006). La estructura porosa del biochar puede retener el agua y mejorar el balance de agua que resulta en una mayor disponibilidad de nutrientes (Asai *et al.*, 2009; Major *et al.*, 2010). El biochar tiene también la capacidad de ser un adsorbente químico (Chun *et al.*, 2004). Se menciona que para ser un adsorbente eficaz, el biochar necesita tener suficiente porosidad para crear el área de superficie requerida para la adsorción de diversos compuestos orgánicos incluyendo fenoles (Han *et al.*, 2013). Durante la pirolisis, el componente de carbono de la biomasa se convierte no sólo a biochar sino también los productos volátiles, tanto orgánicos como inorgánicos (Boroson *et al.*, 1989; Gilbert *et al.*, 2009).

El biochar también presenta alcalinidad la cual es influenciada por tres factores: (i) los grupos funcionales orgánicos (COOH y –OH) (ii) carbonatos (CaCO₃ MgCO₃) y, (iii) los álcalis (tales como Na y K) inorgánicos (Yuan *et al.*, 2011a).

4.5.4. Efecto de la aplicación de biochar al suelo

El biochar puede provocar cambios al ser aplicado al suelo, entre las cuales, se mencionan el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, aumenta el pH, incrementa la capacidad de retención de humedad por la estructura porosa que presenta, disminuye la densidad aparente del suelo, aumenta la retención de nutrientes, en particular del P disponible para las plantas, aumenta la colonización de hongos micorrizicos, optimiza la eficiencia del uso de fertilizante, mejora la aireación de suelo y la adsorción de elementos contaminantes, reduce los niveles de gases efecto invernadero presentes en la atmosfera y funciona en el suelo como un almacén de carbono (Glaser *et al.*, 2002; Amonette, 2009; Asai *et al.*, 2009; Lehmann y Joseph.,2 009; Major *et al.*, 2010; Jeffery *et al.*, 2011). La enmienda de biochar al suelo también reduce el Al intercambiable y la acidez intercambiable (Yuan y Xu., 2011). Al respecto Lian *et al.* (2006) mencionan que el biochar podría mitigar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, las enmiendas de biochar al suelo pueden aumentar el pH del suelo (en suelos ácidos) y la capacidad de intercambio catiónico. Estos autores mencionan también que mejora la retención de los nutrientes del suelo y el agua, y por lo tanto, el suelo enmendado con biochar reduce la lixiviación de N. Al respecto, Novak *et al.* (2010) encontraron que el biochar hecho de conchas de nuez puede reducir la lixiviación de nitratos del suelo durante 25 días. Resultados similares fueron observados por Deenik *et al.* (2010) y Asai *et al.* (2009) quienes reportaron, que la adición de biochar al suelo puede mejorar las propiedades físicas y químicas y al mismo tiempo favorece un buen rendimiento del cultivo de arroz especialmente en suelos con baja fertilidad. Mientras tanto, la incorporación de biochar en el suelo puede ser utilizado como acondicionador de suelos para mejorar la fertilidad del suelo, principalmente por su alta capacidad de retención de agua y nutrientes (Chen *et al.*, 2008)

Lehmann y Joseph (2009) y Major *et al.* (2010) sugieren que los componentes de carbono en biochar proveniente de madera, son altamente recalcitrante en los suelos, esto es que resisten la oxidación química y biológica. Por estas características recalcitranticas, la adición de este producto al suelo puede actuar como un sumidero potencial de carbono (Velejen *et al.*, 2009).

4.6. Carbón Mineral

El carbón es una mezcla compleja de restos vegetales que se acumuló en ambientes anegados y ha sido transformado por agentes microbianos y otras actividades diagenéticas a un color marrón o negro, a veces brillante. En tanto como una gran variedad de plantas, tanto vasculares como no vasculares, la formación de cada uno contribuye con diferentes compuestos químicos a la turba y el grado de degradación de los compuestos. Esto varía ampliamente, existe una mezcla casi infinita de diferentes compuestos, formada por macromoléculas de diferentes compuestos biopolímeros alterados que se encuentran en la plantas (Hatcher y Clifford, 1997). El carbón también es una roca sedimentaria formada por un proceso geológico llamado carbonización en el que los materiales orgánicos se transforman gradualmente en materiales con mayor contenido de carbono (Carrasco Lourtau *et al.*, 2015)

4.7. Carbón vegetal

Carbón vegetal es el producto que se obtiene de la carbonización de la madera en condiciones controladas. Durante el proceso de carbonización se controla la entrada del aire para que la madera no se quemara como sucede en un fuego convencional, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal, el cual es un producto sólido, frágil y poroso, con un alto contenido de carbono (hasta un 80 %). Se produce por el calentamiento de la madera en ausencia de aire (hasta temperaturas de 400 a 700°C), y se emplea principalmente como combustible doméstico, para cocinar y calentar (FAO, 1983). El carbón es una de las fuentes de combustibles fundamentales para el sector residencial en México (Serrano-Mandrano *et al.*, 2014).

El carbón vegetal es una forma de carbono amorfo que se deriva de la madera por combustión incompleta de pirolisis, incluyen diversos tipos de carbón como los coques, humo negro (carbono negro), hollín y todas las otras formas de carbono que no son cristalinos (Humphreys y Ironside, 1977). Las materias primas utilizadas son generalmente las virutas de madera, ramas, aserrín, residuos agrícolas, residuos forestales, o podas, por otro lado se hace mención que las propiedades del carbón vegetal depende tanto de la materia prima utilizados como en las condiciones del proceso de producción (Rubio *et al.*, 2009). Por otro lado, carbón vegetal también se le puede llamar a los residuos que quedan después de la combustión incompleta de la vegetación es decir después de un incendio estos mismos pueden contribuir significativamente al contenido de carbono de los suelos (Baldock y Smernik, 2002). El carbón vegetal se compone principalmente por C

aromático, pero se caracteriza por diversos grados de aromaticidad (Francioso *et al.*, 2011). Los residuos de carbón son una importante proporción de la producción total de carbón vegetal y puede ser utilizado como acondicionador del suelo para aumentarla fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos en suelos ácidos y altamente erosionado (Swami *et al.*, 2009).

El carbón vegetal tiene muchas características atractivas: contiene prácticamente cantidades bajas de azufre o mercurio y es bajo en nitrógeno, también presenta un contenido de cenizas muy bajo, puede ser un buen adsorbente con un área de superficie grande y casi como un metal con una resistividad eléctrica comparable a la de grafito. Los recientes avances en el conocimiento sobre la producción y las propiedades del carbón presagian su mayor uso como combustible renovable, reductor, adsorbente y como enmienda del suelo. El uso generalizado de carbón como una enmienda al suelo, tiene un doble efecto primero secuestra carbono y segundo reduce los gases de efecto invernadero ya que el contenido de materia volátil del carbón de leña se encuentra en un intervalo de aproximadamente 40-10% cuando se somete a temperaturas de pico más altas (es decir, carbonizado), el restante de materia volátil del carbón vegetal es expulsado, dejando un producto de carbono casi puro (Jr. y Gronli, 2003). En otro trabajo donde se realizó la caracterización de sustancias húmicas obtenidas por oxidación química de carbón vegetal de eucalipto encontraron que el carbón tiene un grado alto de aromaticidad y también había presencia de grupos carboxílico (Trompowsky *et al.*, 2005)

Muchos años atrás hay antecedentes de haberse estudiado el uso de carbón vegetal en el suelo, ya que Tryon (1948) en su revisión cita a los siguientes autores: Verona y Ciriotti, (1935), Verona (1938), Perotti y Verona, (1938), Toumey y Korstian, (1942), y Retan, (1915), cuyos resultados demuestran efectos positivos en las propiedades físicas ya que mejora en la retención de agua y mejora la estructura. En las propiedades químicas reduce la acidez, se incrementa el contenido de carbono, incrementa las bases intercambiables y las sustancias tóxicas para el crecimiento de plantas pueden ser adsorbidos por el carbón vegetal. Los efectos del carbón vegetal en las propiedades biológicas, muestran que incrementa ligeramente el crecimiento del frijol y maíz, incrementa la producción de plántulas de coníferas en vivero, mejora como la arcilla pesada, favorece ligeramente en la nitrificación y mejora la fijación de nitrógeno.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Suelo Utilizado

La muestra de suelo bajo estudio fue tomada de la capa arable, 0 a 20 cm de profundidad, en el área cañera de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco, situada en las coordenadas 17°54'11'' de latitud norte y 93°35'03'' de longitud oeste, en la Ranchería "La Esperanza". En el punto de muestreo se realizó un perfil de suelo para la identificación, descripción y caracterización del suelo de acuerdo a la metodología propuesta por Cuanalo (1990). La muestra de suelo se secó al aire a temperatura ambiente y a la sombra, después se molió y se pasó a un tamiz de 2 mm antes de su uso en los experimentos de incubación. Posteriormente fueron determinados las propiedades físicas y químicas del suelo como la densidad aparente, textura, pH, pH KCl, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiable (extraída en acetato de amonio a pH 7), nitrógeno total, materia orgánica y carbono orgánico (por el método de oxidación húmeda), relación C/N (fue calculado por el contenido total de C sobre N total), acidez y aluminio Intercambiable por el método de Barnhisel y Betsch que utiliza KCl, todos los parámetros fueron analizados con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 1). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de suelos planta y agua (LASPA) del Colegio de Postgraduado, Campus Tabasco.

Cuadro 1. Metodología de la NOM-021-RECNAT-2000 empleadas para la caracterización del suelo.

Parámetro	Metodología
pH	Método AS-02 medido en agua
pH KCl	Método AS-24 medido en cloruro de potasio
Conductividad eléctrica	Método AS -18
Densidad aparente	Se realizó a través del método AS-03 utilizando parafina
Textura del suelo	Por el método AS-09 por el procedimiento de Bouyoucos
Materia orgánica	Se realizó a través del método AS-07, de Walkley y Black.
Nitrógeno total	A través del método AS-25 por procedimientos de Kjeldahl.
Fosforo Extraíble	A través del método AS-11, por el procedimiento de Olsen.
CIC y bases intercambiables	A través del método AS-12, empleando acetato de amonio 1N, pH 7.0.
Acidez intercambiable (Al + H)	A través del método AS 33. procedimiento de cloruro de potasio

5.2. Características de los residuos de carbón vegetal empleados

El carbón vegetal es producido de manera artesanal (Anexo 1) y es comercializado por la empresa "El Cocoite" de Villahermosa, Tabasco (anexo 2).

Durante su proceso de producción del carbón se midió la temperatura, el tiempo que se llevó a cabo el proceso de producción de esta carbonera fue de 48 horas en la cual se midió la temperatura cada hora promediando la temperatura cada 12 horas, la temperatura se midió con un termómetro laser (Infrared thermometer -50 °C a + 900°C (-58 °Fa+1652°F))

La materia prima utilizada en la producción del carbón, son de diferentes especies, las más utilizadas son *Guazuma umlifolia* (Guácimo), *Spondias mombin* L. (Jobo), *Psidium guajava* (Guayabo) y *Gliricidia sepium* (Cocoíte). Estos son procedentes de la limpia o poda de los campos ganaderos y agrícolas de la zona, por lo tanto son muy variables los materiales utilizados.

El residuo de carbón vegetal que se utilizó no es comercializable por la empresa (Anexo 4), ya que para la selección del carbón, este es pasado por una criba (Anexo 3) y lo que pasa la criba se considera que no llena los requisitos para su venta por ser muy pequeño en tamaño

Después de coleccionar el material se trasladado al laboratorio de análisis de Suelos, Plantas y Aguas LASPA del Colegio de Postgraduado, Campus Montecillo donde se realizaron los análisis.

5.3. Determinación de las propiedades químicas y físicas del residuo de carbón

El residuo de carbón vegetal fue tamizado a 2 mm, las mediciones de pH y conductividad eléctrica se realizaron con una dilución carbón: agua 1:20 con un tiempo de agitación de 1.5 horas de acuerdo a Rajkovich *et al* (2011). El fosforo extraíble se determinó con ácido cítrico al 2% por el procedimiento descrito por Wang *et al.* (2012). El carbono total fue determinado con un analizador automático TOC 5050 Shimadzu (Total Organic Carbón Analyzer), el nitrógeno total se determinó por el método semi micro-Kjeldahl, y la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiable se determinaron por saturación de 1.0 g del residuo del carbón vegetal desplazando los cationes con acetato de amonio 1N pH7 y en el lixiviado se cuantificaron las bases cambiables mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) y emisión, por el procedimiento descrito por (Rajkovich *et al.*,2011). También se determinó la acidez intercambiable con base en la NOM-021-RECNAT-2000 y la densidad aparente por el método de la parafina. La microporosidad del carbón vegetal se observó con un microscopio electrónico de barrido JEOL-JSM6390 (SEM, por sus siglas en ingles), con un Scanning Electron Microscopy.

5.4. Preparación del suelo para su posterior incubación

Para el experimento en incubación se pesaron lotes de 300 g de suelo seco, a los que se les añadió las diferentes dosis de residuo de carbón tamizado a 2 mm (Figura 2) las dosis de carbón fueron las siguientes: testigo(sin carbón), 1.20 g, 1.8 g, 2.4 g, 3.0 g, 3.6 g, 4.2 g y 4.8 g estos corresponden a 0 tha^{-1} , 10 tha^{-1} , 15 tha^{-1} , 20 tha^{-1} , 25 tha^{-1} , 30 tha^{-1} , 35 tha^{-1} y 40 tha^{-1} , respectivamente y se mezclaron vigorosamente para homogenizar cada lote.

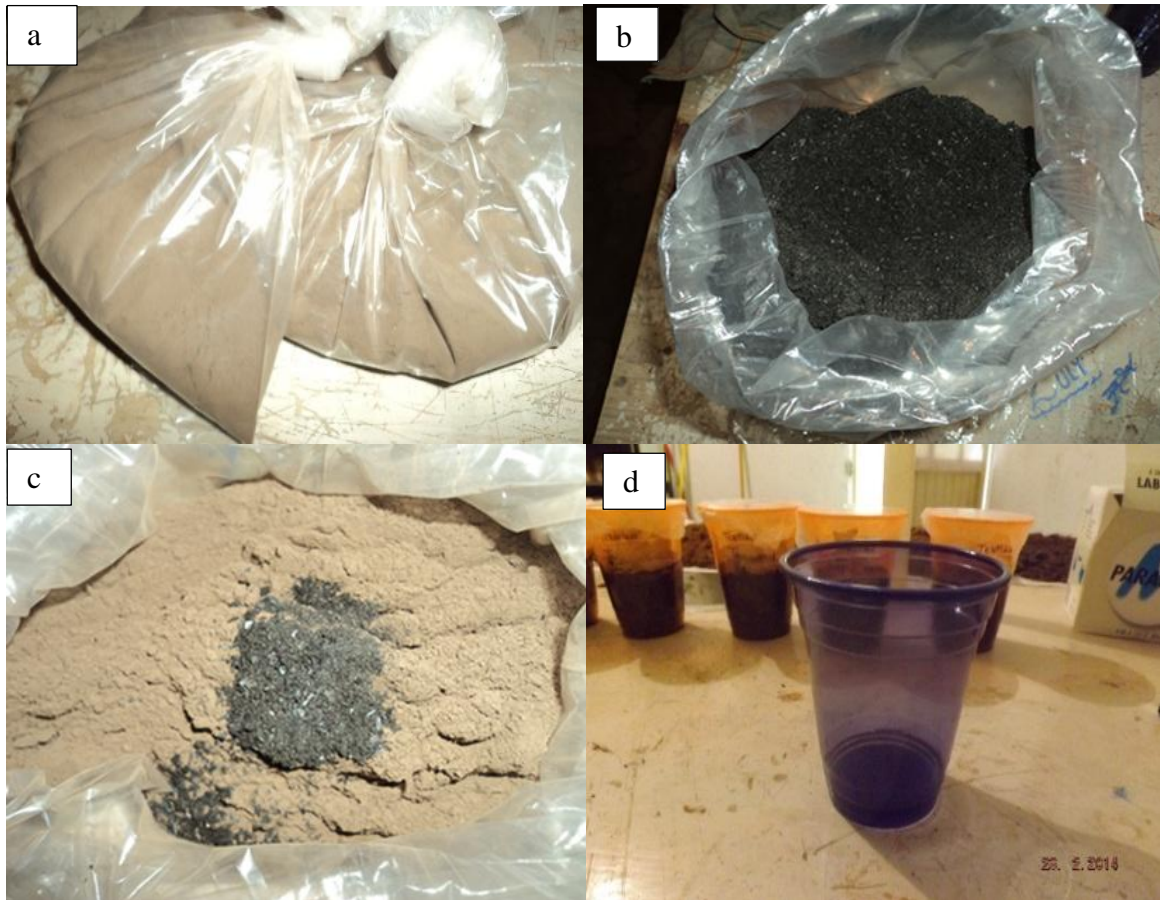


Figura 2. Materiales empleados para la incubación de la mezcla de suelo carbón vegetal a) residuo de carbón vegetal tamizado. b) mezcla suelo con carbón, c) homogenización de la muestra, d) Vasos en que se estableció el experimento

Las mezclas se depositaron en vasos de plástico de diferentes colores (cada color representó un tratamiento) con cinco repeticiones (Figura 3), los niveles de humedad se adecuaron con la adición de agua destilada suficiente para mantener el suelo a un 80% de su capacidad de campo y se cubrió con papel parafilm para evitar cualquier contaminación (Figura 3).



Figura 3. Distribución de los tratamientos con vasos de colores para diferenciar cada uno de ellos.

5.5. Experimento de incubación

Las muestras se incubaron en un anaquel metálico cubierto con un plástico negro para evitar al máximo posible la entrada de luz, se mantuvo a temperatura ambiente un promedio de 25 °C a 30 °C (anexo 7), y la humedad al 80 % de la capacidad de campo, los periodos de incubación fueron de 45 y 90 días. Para asegurar el contenido de humedad del suelo los botes se pesaron diariamente reponiendo el agua perdida y así mantenerlas al mismo contenido de humedad original.

5.6. Análisis del suelo después de la incubación

Para evaluar los efectos del residuo de carbón sobre las propiedades del suelo al término de cada período de incubación, se extrajo el suelo de los vasos, se secó al aire y a la sombra (Figura 4), se molió y tamizó a través una malla de 2 mm. Se separaron algunos terrones para la determinación de la densidad aparente. A una parte del suelo se le determinó la capacidad de campo posteriormente se determinó la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente por el método de la olla de presión y membrana de presión. Todos los parámetros físicos y químicos se determinaron con las metodologías con base a la NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 1). En el primer periodo de muestreo se tomaron 100 g de suelo de cada tratamiento y en el segundo muestreo se tomó el resto de los suelos incubados.

5.7. Análisis estadísticos

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones por tratamiento y con arreglo factorial de los tratamientos, donde los factores fueron, por un lado las dosis de residuos de carbón con ocho niveles, y por otro lado el tiempo de incubación con dos

niveles (al 45 y a los 90 días). Los resultados se analizaron por medio de un análisis de varianza (ANOVA) con base en el diseño factorial y la comparación de medias de Tukey al 0.5%. Para el análisis se utilizó el paquete SAS versión 9.4.

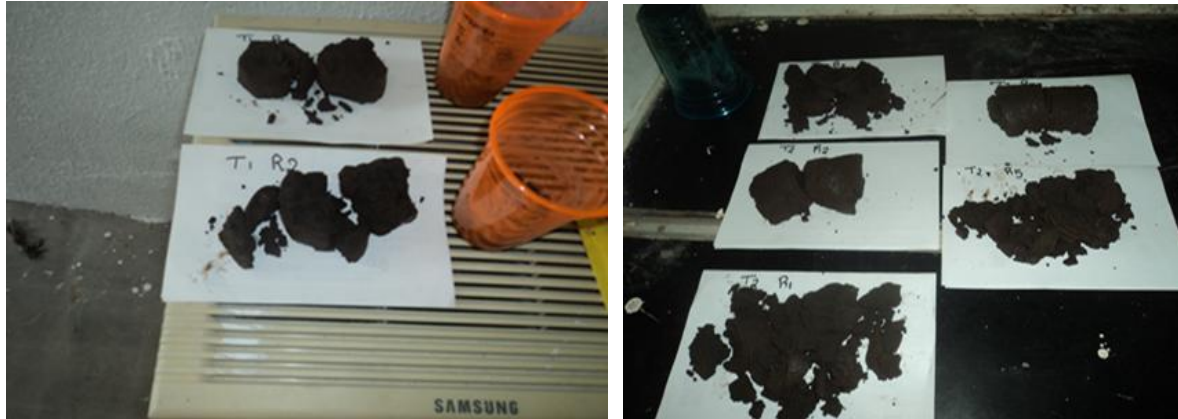



Figura 4. Apariencia del suelo con carbón vegetal después de los 90 días de incubación

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Características físicas y químicas del suelo Acrisol utilizado

El suelo utilizado para el experimento en la incubación fue clasificado como un suelo Acrisol (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción del perfil de suelo Acrisol Férrico (ACfr) utilizado para el experimento

Perfil 1		Horizontes (cm)		Descripción del perfil									
	Ap-(0-12)	Seco; color pardo amarillento oscuro (10YR3/4); motas de color gris oscuro (10YR4/1); textura franco arcillo arenosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares muy finos, finos y medios; consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo firme y en muy húmedo ligeramente pegajoso y ligeramente plástico; poros frecuentes muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, en forma tubular; permeabilidad rápida; raíces abundantes, finas, delgadas y medias; fauna lombrices y hormigas; pH de campo 5.0.											
	E (12-31)	Transición media y horizontal; ligeramente húmedo; color pardo amarillento (10YR5/6); motas de color pardo amarillento (10YR5/4); textura franco arcillo arenosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares muy finos, finos y medios; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados y poros, de materiales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, en forma tubular; permeabilidad rápida; raíces comunes, finas, y delgadas; fauna lombrices y hormigas; pH de campo 5.0.											
	Bt ₁ (31-65)	Transición media y horizontal; húmedo; color rojo (2.5YR5/8); motas de color pardo rojizo oscuro (5YR3/3); textura arcillo arenosa; estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares muy finos, finos y medios; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados y poros, de materiales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, en forma tubular; permeabilidad moderada; raíces pocas, finas, y delgadas; pH de campo 5.0.											
	Bt ₂ (65-98)	Transición tenue y horizontal; húmedo; color rojo (2.5YR5/6); motas de color pardo muy pálido (10YR8/4); textura arcillo arenosa; estructura moderadamente desarrollada en bloques subangulares muy finos, finos y medios; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo, pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados y poros, de materiales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, en forma tubular; permeabilidad rápida; pH de campo 5.0.											
	C (98-150)	Transición tenue y horizontal; húmedo; color rojo (2.5YR5/8); motas de color amarillo (10YR7/8); textura migajón arcillo arenosa; estructura moderadamente desarrollada en bloques subangulares muy finos, finos y medios; consistencia en húmedo firme y en muy húmedo, pegajoso y ligeramente plástico; cutanes por eluviación, continuos y espesos en caras de agregados y poros, de materiales arcillosos con óxidos de hierro; poros frecuentes muy finos, continuos, caóticos, dentro y fuera de agregados, en forma tubular; permeabilidad rápida; pH de campo 5.0.											
Horizontes	pH(H ₂ O)	MO	Nt	P mg kg ⁻¹	K	Ca	Mg	Na	CIC	Arcilla	Limo	Arena	Textura
			(%)		Cmol (+) kg ⁻¹					%			
Ap-(0-12)	4.91	4.48	0.07	11.1	0.11	1.49	0.61	0.08	11.0	20	17	63	Migajón arcillo arenoso
E (12-31)	4.83	1.54	0.03	0.22	0.06	1.20	0.38	0.03	11.5	36	11	53	Arcillo arenoso
Bt ₁ (31-65)	4.84	1.00	0.02	0	0.05	1.39	0.35	0.04	8.3	50	13	37	Arcilla
Bt ₂ (65-98)	4.74	0.60	0.01	0	0.05	0.75	0.28	0.04	7.3	44	13	43	Arcilla
C (98-150)	4.46	0.47	0.01	0	0.04	0.48	0.30	0.04	9.4	38	13	49	Arcillo arenoso

Por sus características particulares se considera como un suelo Acrisol Férrico (Arcílico, Cutánico), de acuerdo a las descripciones por Palma-López *et al.* (2007) y basados en la clasificación WRB (IUSS Working Group WRB, 2014). Son suelos fuertemente desarrollados, ácidos y con fuerte lixiviación de bases intercambiables. Está constituido por arcillas de baja reactividad por lo que presenta baja CIC, sobre todo en el horizonte árgico (Bt), el cual se encuentra enriquecido de arcilla iluvial. El horizonte superficial muestra una mejor nutrición, sin embargo, la MO que contiene es mayormente humus residual y debido a la acidez no se mineraliza lo suficiente, por lo que no existe una mineralización neta de la MO y por lo tanto hay bajos contenidos de N mineral.

En el cuadro 3, se observa que el suelo presenta en la capa arable un pH (H₂O) fuertemente ácido con la probabilidad de llegar a un grado de acidez hasta 3.8. La conductividad eléctrica (CE) fue de 0.047 dSm⁻¹ indicó un efecto despreciable a la salinidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue baja (8.85 cmol kg⁻¹) de igual forma la concentración de nitrógeno total (Nt) (0.055 %). El porcentaje de materia orgánica (MO) fue alto (3.25 %) y la relación, C/N (34). La densidad aparente (Da) fue de 1.24 gcm⁻³ y de acuerdo a la textura corresponde a un suelo franco arcillo arenoso (Cuadro 1), estos resultados se clasifica de acuerdo como lo mencionado por la norma mexicana NOM-021-RECNAT (2000). Según Palma-López *et al* (2007) los suelos presentan muy bajos contenidos de nutrimentos.

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas del suelo ACfr a los 20 cm.

Parámetros	Da	pH	pH KCL	CE	CIC	Nt	MO	CO	C/N	Textura		
	gcm ⁻³			dSm ⁻¹	Cmol(+)kg ⁻¹		%	%		Arcilla	Limo	Arena
Resultados	1.24	5.1	3.8	0.047	8.85	0.05	3.25	1.89	34.32	53	15	32

6.2. Caracterización del residuo de carbón vegetal

En el proceso de producción del carbón vegetal la temperatura en la superficie de la carbonera (lugar en donde se produce el carbón en forma rústica, con forma cónica, ver anexo) varió desde 129 °C hasta 171°C (Cuadro 4). Al final de la producción la temperatura alcanzo los 375 °C, registro que se realizó en un trozo de carbón vegetal recién sacado de la carbonera. La temperatura de producción carbón vegetal utilizado fue semejante a la usada por (Novak *et al.*, 2009;

Mukherjee *et al.*, 2011; Al-Wabel *et al.*, 2013) para elaborar biochares producidos a temperatura de pirolisis baja (entre 200°C y 400 °C).

Cuadro 4. Temperatura promedio durante el proceso de producción del carbón vegetal

Factores	Horas			
	12	24	36	48
Temperatura °C	129	163	178	171

El análisis del residuo de carbón vegetal (Cuadro 5) muestra que este tiene un pH fuertemente básico (9.7). En la literatura biocarbones con valores elevados de pH han sido obtenidos a partir de rastrojos de arroz (pH 9.7) (Shenbagavalli y Mahimairaja. (2012). Otros biochares reportados son menos alcalinos, tal es el caso del biochar de *Prosopis* (pH 7.57), y de madera de roble (pH 6.38). Lehmann *et al.* (2011). Según Břendová *et al.* (2012) las variaciones de pH se dan por las condiciones de la pirolisis y el tipo de material usado en este proceso. Asimismo la producción de biochar usando pirolisis de alta temperatura genera materiales alcalinos (Al-Wabel *et al.*, 2013). Valores de pH elevados se explican principalmente por la generación de sales alcalinas de los materiales orgánicos a altas temperatura (Yuan *et al.*, 2011a).

La densidad aparente del residuo de carbón vegetal estudiado fue de 0.58g/cm³ valor semejante a los obtenidos para biochar de madera de *Prosopis* 0.54 cm⁻³, (Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012).

La conductividad eléctrica: del residuo de carbón vegetal presento un valor de 1.15 dSm⁻¹ (Cuadro 5) más baja que las obtenidas por Shenbagavalli y Mahimairaja (2012) para diferentes biochares a partir de pirolisis de varios materiales biológicos como los de paja de arroz, rastrojo el maíz desechos de coco y madera de *Prosopis* (2.41, 4.14, 3.25, 1.3 dSm⁻¹ respectivamente) y más alto que cáscara de coco, cáscara de maní (0.73 y 0.39 dSm⁻¹ respectivamente).

El porcentaje de nitrógeno total del residuo de carbón fue de 1.08 %, valor que es cercano al reportado por Břendová *et al.* (2012) 1.01 % Nt en un biochar producido de diferentes maderas. El valor de Nt fue ligeramente más alto que el 0.6 2%, valor obtenido por Al-Wabel *et al.* (2013) para un biochar de *Conocarpus*. La variación en los contenidos de nitrógeno total se atribuyen a la materia prima utilizada, ya que está determinada en gran parte las propiedades del biochar (Břendová *et al.*, 2012).

El contenido de carbono total del residuo de carbón fue de 33 % (Cuadro 5), este fue más bajo que el 62 % a 63 %, valor obtenido para biochar de mezclas de diferentes maderas (Břendová *et al.*,

2012). El porcentaje total de carbono de un biochar lo definen las condiciones de producción y el tipo de material proveniente.

El fósforo extraíble con ácido cítrico fue de 371.3 mg kg⁻¹ (Cuadro 5), el cual es un valor más alto que (255 mg kg⁻¹) valor reportado por Rajkovich *et al.* (2011) para un biochar producido de madera de pino a una temperatura de pirolisis de 300°C.

La capacidad intercambio catiónico (CIC) del residuo de carbón vegetal fue de 40.53 cmol (+) kg⁻¹ (Cuadro 5), un valor semejante 41.4 cmol(+)⁻¹ fue reportado por Rajkovich *et al* (2011) para un biochar producido de madera de roble. Pero valores más bajos de CIC (30.4 cmol(+)⁻¹) se reportan para biochar de madera de pino, los dos biochares producido a una temperatura de pirolisis de 300 °C. Otros autores como Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) obtuvieron un valor de 16 cmol (+) Kg⁻¹ para un biochar derivado de madera de *prosopis*, valor menor al obtenido en este trabajo. Así mismo Kloss *et al.* (2012) reportaron un valor de 14.4 cmol(+)⁻¹ para un biochar de madera de álamo producido a una temperatura de pirolisis de 400°C. Estos mismos autores reportaron disminución de la CIC del biochar conforme aumenta la temperatura de pirolisis.

Cuadro 5. Características físicas y químicas del residuo del carbón vegetal

Parámetros	Da	pH	CE	Nt	CO	P	CIC	Ca	Mg	K	Na	Acidez
físico y químicos	g/cm ⁻³		dsm ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	cmol(+) ⁻¹					
Resultados	0.58	9.7	1.15	1.0	33.3	371.3	40.53	21.3	2.0	46.5	0.46	0.30

Las bases intercambiable fueron de Ca 21.3 cmol(+)⁻¹, Mg 2.0 cmol(+)⁻¹, K 46.5 cmol(+)⁻¹ y Na 0.46 cmol(+)⁻¹ (Cuadro5). Estos valores son más elevados que los indicados por Rajkovich *et al* (2011) para biochars producidos de madera de roble y pino, ellos obtuvieron para Ca 1.2 cmol(+)⁻¹, Mg 0.1 cmol(+)⁻¹, K 0.6 cmol(+)⁻¹, y 0.3 cmol (+) kg⁻¹ de Na.

Con respecto a la porosidad, al analizar las imágenes de microscopia electrónica de barrido (ME, en partículas grande no se observaron poros en el residuo de carbón vegetal las superficies son muy lisas. Sin embargo, en partículas pequeñas es posible observar algunos poros (Figura 5). En general se puede considerar que los residuos de carbón utilizados no presentaron la porosidad observada para otros biochares (Mankasingh *et al.*, 2011) (Figura 6)

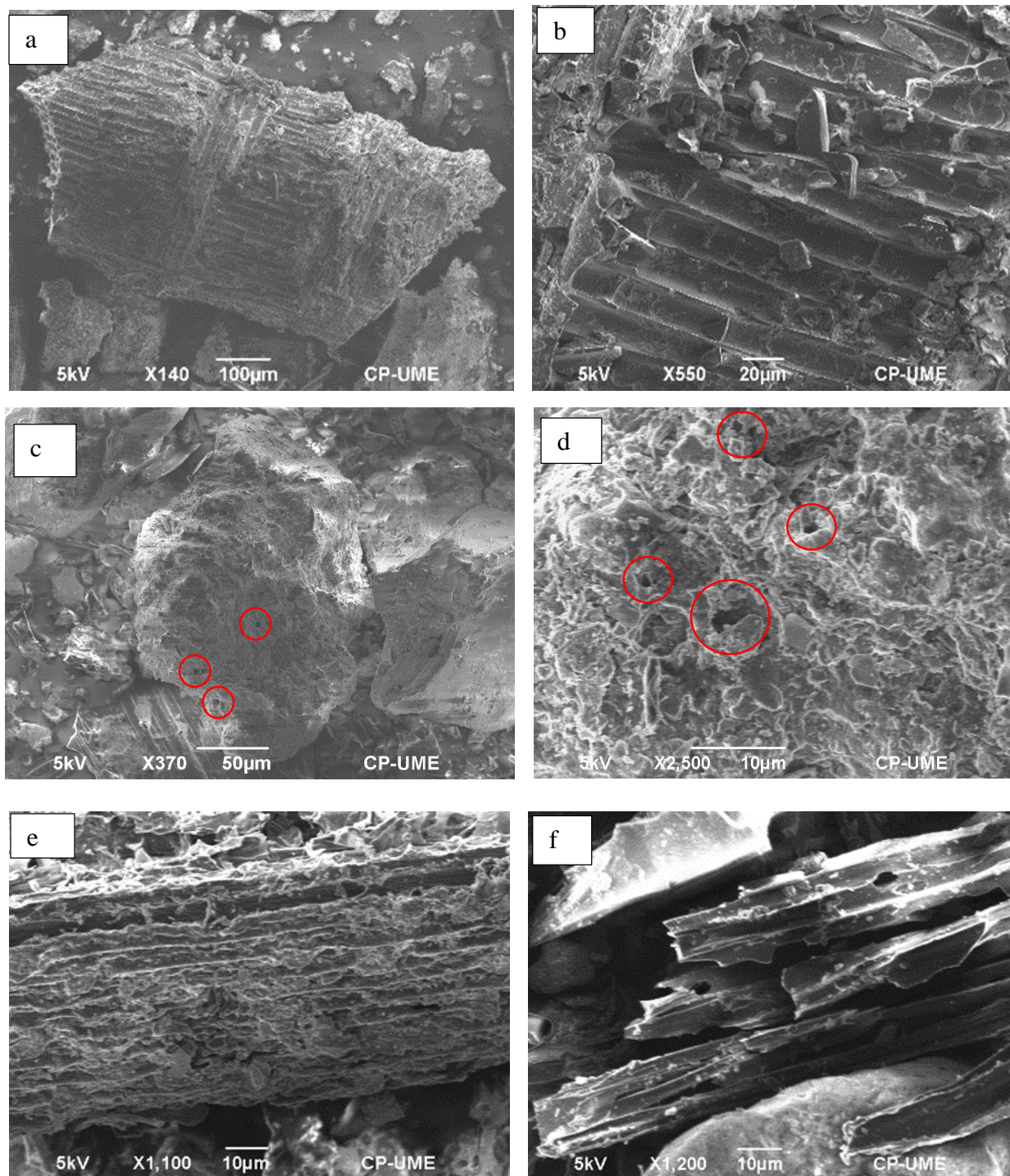


Figura 5. Vista microscópica en microscopía electrónica de barrido (MEB) del residuos de carbón vegetal a) partícula grande (vista general), b) detalle de la porosidad de partícula grande, c) vista de partícula más pequeña, d) detalle de poros de partícula más pequeña, e) partícula grande(vista transversal, f) vista alargada de la misma partícula Microscopía electrónica de barrido)

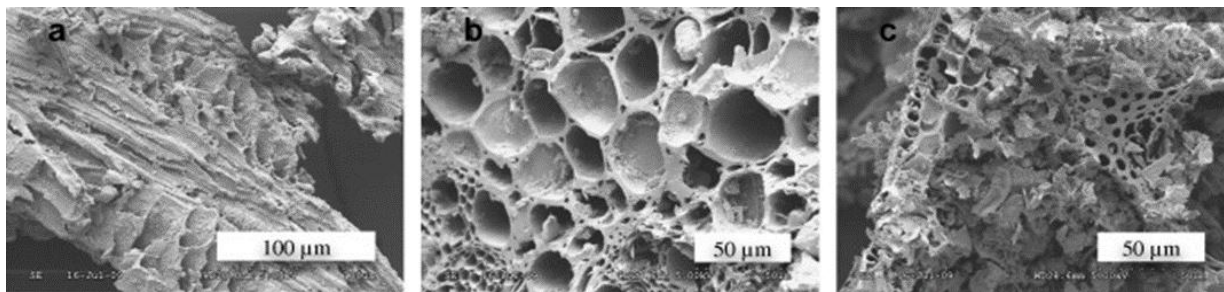


Figura 6. Imágenes SEM de biochars de (a) aserrín, (b) cascara de arroz) y (c) hojas de palma tomado por Mankasingh et al. (2011)

6.3. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre las propiedades físicas del suelo después de la incubación.

Capacidad de campo (CC). El análisis de varianza efectuado con los datos de capacidad de campo (Cuadro 6) establece que la adición de residuos de carbón vegetal al suelo tiene un efecto significativo en el aumento de la capacidad de campo, asimismo para el tiempo de incubación también presenta un efecto significativo, así como a la interacción, con un coeficiente de variación de 3.51% que se considera confiable. La prueba de Tukey indica que la adición de 30 tha^{-1} de biochar al suelo incrementa la CC en 4%, respecto al suelo que no recibió biochar, lo cual se considera positivo ya que el suelo puede retener más humedad disponible para el cultivo. Con respecto al tiempo de incubación a los 45 días se presentó mayor capacidad de campo en el suelo disminuyendo a los 90 días. Lo anterior parece indicar, que este beneficio solo fue temporal.

Punto de marchitamiento permanente (PMP). El análisis de varianza realizado para el variable punto de marchitamiento permanente (Cuadro 7), señala que el aplicar residuo de carbón vegetal al suelo incrementa significativamente el PMP en relación directa con la dosis empleada. Con respecto al tiempo de incubación se presenta también un incremento significativo conforme aumenta el tiempo. La interacción de los dos factores también fue significativa. El coeficiente de variación asociado con esta medición fue de 4.14%. La interacción nos indica que de 0 a 30 tha^{-1} de biochar en el periodo de 45 días el PMP sufrió una reducción en el porcentaje de humedad comparado con los datos observados a los 90 días. Dosis mayores de biochar tendieron a incrementar significativamente la humedad en el PMP.

Humedad aprovechable (HA): El análisis de varianza efectuado con los datos de humedad aprovechable (Cuadro 8) establece que la adición de residuos de carbón vegetal al suelo tiene un efecto significativo en el aumento de la humedad aprovechable, asimismo para el tiempo de

incubación también presenta un efecto significativo, así como a la interacción, con un coeficiente de variación de 7.04 % que se considera confiable. La comparación de medias con prueba de Tukey indica que las dosis aplicada al suelo a 25 t ha⁻¹, 30 t ha⁻¹, 35 t ha⁻¹, 40 t ha⁻¹ respectivamente, presentaron los mayores porcentajes de humedad aprovechable. Con respecto al tiempo de incubación a los 45 días se presentó mayor retención de humedad en el suelo disminuyendo a los 90 días.

En este trabajo se puede observar que al adicionar residuo de carbón vegetal al suelo mejora sus propiedades físicas ya que incrementó tanto la capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y la humedad aprovechable; al respecto resultados similares fueron observado por Jones *et al.*, 2010 y Lair *et al.*, (2010) al adicionar biochar al suelo incremento la capacidad de campo del suelo y la capacidad de retención de agua disponible.

Cuadro 6. Capacidad de campo (CC %) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	19.6c	19.0c	19.8c	19.6c	24.16a	24.2a	24.3a	24.1a	21.8a
Tiempo incubación 90 días	19.3c	18.6c	19.6c	19.1c	21.8b	22.7ab	23.2ab	22.3b	20.8b
Medias de dosis carbón	19.5b	18.8b	19.7b	19.4b	23.0a	23.4a	23.7a	23.2a	
CV (%):	3.51								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0126*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 7. Punto de marchitamiento permanente (PMP) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	9.46ef	8.7f	8.8f	8.9f	11.4bcd	12.2ab	11.7abc	12.4a	10.4b
Tiempo incubación 90 días	10.9cd	10.4de	10.6d	10.4de	12ab	12.2ab	12.5a	12.2ab	11.4a
Medias de dosis carbón	10.2b	9.5c	9.7bc	9.7bc	11.7a	12.2a	12.1a	12.3a	
CV (%):	4.14								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0001*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 8. Humedad aprovechable (HA %) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Factores de estudio	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	T	10	15	20	25a	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	10.16cdef	10.2cdef	10.92bcd	10.69bcd	12.72	12ab	12.68a	11.6abc	11.39a
Tiempo incubación 90 días	8.37g	8.23g	9.01efg	8.68fg	9.81defg	10.48bcde	10.5bcd	10.06cdef	9.39b
Medias de dosis carbón	9.27c	9.25c	9.97bc	9.69c	11.26a	11.24a	11.59a	10.85ab	
CV (%):	7.04								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0001*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Densidad aparente (Da): El análisis de varianza para la densidad aparente (Da) indica diferencias significativas tanto a las dosis y el tiempo de incubación pero no en la interacción de estos factores. El ANOVA muestra un coeficiente de variación de 4.94 % el cual se considera aceptable. El efecto significativo mayor se observó al final de la incubación con la dosis aplicada de 40 t ha⁻¹ (cuadro 9).

Cuadro 9. Densidad aparente Da (g cm³) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos Factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	1.15a	1.11a	1.13a	1.25a	1.16a	1.12a	1.14a	1.23a	1.15a
Tiempo incubación 90 días	0.97a	0.97a	0.98a	0.98a	0.99a	0.98a	0.96a	1.13a	1.00b
Medias de dosis Carbón	1.06 b	1.04 b	1.06 b	1.05b	1.07 b	1.05 b	1.05 b	1.18 a	
CV (%):	4.94								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001 *								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.7942 n.s.								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

En general el suelo muestra una Da apropiada, sin embargo se alcanza a detectar una mejoría aumentando fuertemente la dosis del residuo de carbón vegetal 40 t ha⁻¹; lo contrario ocurre con el tiempo de incubación el cual muestra un decremento de la Da con el tiempo, hasta niveles que indicarían alta porosidad y, por lo tanto, una reducción de la humedad aprovechable en el suelo (Cuadro 9). Al respecto Muukherjee y Lai. (2013) mencionan que la adición del biochar al suelo cambia sus propiedades, en especial incrementa el área superficial y disminuye la densidad aparente, lo cual coincide con los resultados de Picolo *et al.* (1997), donde mencionan que suelos

enmendados con ácido húmico derivado del carbón presentan una mayor porosidad, macro porosidad y menor densidad aparente.

6.4. Efecto del residuo de carbón vegetal en el pH del suelo

El análisis de varianza del pH en agua (Cuadro 10) muestra efectos significativos para las dosis de biochar, el tiempo de incubación y su interacción. El coeficiente de variación fue 0.4%, que se considera aceptable. El pH del suelo sin biochar se clasificó como fuertemente ácido. La adición de biochar solo produjo incrementos pequeños en el pH clasificándose como moderadamente ácido (Salgado *et al.*, 2013). La prueba de Tukey muestra una tendencia de incremento conforme se aumenta las dosis de residuo de carbón vegetal, el pH mayor se encontró con la dosis de 35 t ha⁻¹. En cuanto al tiempo de incubación el comportamiento muestra un incremento significativo con el tiempo (Cuadro 10).

Lo anterior se debe, a que el pH del residuo de carbón vegetal que se utilizó es alcalino (9.7) (cuadro 3), al respecto Mankasingh *et al.* (2011) recomiendan utilizar biochar producido con pirolisis a temperaturas altas, que contiene mayor porcentaje de cenizas, lo cual aumenta la alcalinidad del biochar y al ser adicionado al suelo eleva su pH. Una influencia similar se observó después de la aplicación de carbón vegetal aumentando el pH y disminuyendo la saturación de Al en suelos ácidos (Glaser *et al.*, 2002). En otro trabajo realizado por Fellet *et al.* (2011), al aplicar biochar en jales mineros encontraron que el pH del suelo se incrementó; otra similitud se dio al aplicar biochar al suelo y después de ser incubado durante 500 días, aumentó significativamente casi 1 unidad de pH (Laird *et al.*, 2010). Si se comparan los valores con lo establecido por la NOM 021, se observa que este suelo paso a ser de fuertemente ácido a moderadamente ácido (cuadro 10).

6.5. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre su reacción (pH) en KCl del suelo

El análisis de varianza para el pH medido en KCl considerado como el pH potencial de los suelos, indica que la enmienda con residuo de carbón vegetal tiene un efecto significativo de las dosis de carbón, del tiempo de incubación y de la interacción de ambos. El análisis tuvo un coeficiente de variación 0.43 el cual se considera aceptable en cuanto a precisión en la estimación (cuadro 8). La comparación de medias mostró que al aplicar residuo de carbón al suelo a las dosis más alta de 35 y 40 t ha⁻¹, respectivamente, se tuvo el mayor pH diferenciándose significativamente del resto de

tratamientos. También se muestra que el tiempo de incubación del suelo favorece significativamente al incremento del pH. El aumento del pH del suelo a mayor adición de carbón está de acuerdo con lo mencionado por Mastro *et al.* (2013) y Kumar *et al.*, (2013) que debido a la concentración de metales alcalinos (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}) presentes en el biochar que al suelo ayuda a reducir la disponibilidad de iones de H^{+} . Este cambio en el pH tendrá un efecto sobre la adsorción de nutrientes en el suelo (Xu *et al.*, 2014).

Cuadro 10. Valor de pH en agua del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	4.91g	5.11e	4.94g	5.17d	5.07ef	5.18cd	5.28a	5.21cd	5.11 b
Tiempo de Incubación 90 días	5.07ef	5.26ab	5.06f	5.22bc	5.18cd	5.22bc	5.21cd	5.11e	5.16 a
Medias de dosis Carbón	4.99 e	5.19 b	5.00 e	5.19 b	5.12 d	5.20 b	5.24 a	5.16 c	
CV (%):	0.406605								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0001*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 11. Valor de pH en KCL del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	4.11h	4.16g	4.04i	4.19g	4.19g	4.28def	4.32c	4.28ef	4.20 b
Tiempo de incubación 90 días	4.27f	4.32dce	4.19g	4.29dcef	4.3dcef	4.32cd	4.37b	4.41a	4.31 a
Medias de dosis Carbón	4.19 d	4.24 c	4.11 e	4.24 c	4.24 c	4.30 b	4.34a	4.34 a	
CV (%):	0.436092								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0001*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

6.6.Efecto del residuo de carbón vegetal en la Conductividad eléctrica (CE) del suelo

El análisis de varianza efectuado a los resultados de la conductividad eléctrica (CE), establece que la adición de residuo de carbón vegetal al suelo, el tiempo de incubación y la interacción de ambos factores, tuvieron efecto significativo sobre esta variable. El coeficiente de variación fue de 11.7 el cual se considera aceptable (Cuadro 12).

La comparación de medias indica que al aplicar 40 t ha⁻¹, se registró un aumento de la conductividad eléctrica de 0.048 dS m⁻¹ a 0.082 dS m⁻¹. Sin embargo cuando se incrementa el tiempo de incubación a 90 días, la conductividad eléctrica disminuye significativamente. Resultados similares fueron reportado por Masto et al. (2013) quienes observaron incremento en la conductividad eléctrica de suelo teniendo un valor de 0.886 (dS m⁻¹), esto debido a la presencia de una alta concentración de sales solubles del biochar. Por otro lado es importante mencionar CE encontradas en este trabajo tienen efectos nulos a la salinidad del suelo según la NOM-021-RECNAT (2001).

Cuadro 12. Conductividad eléctrica (CE dS m⁻¹) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	25	20	25	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	0.048e	0.043e	0.059cde	0.051de	0.069bc	0.075ab	0.076ab	0.086a	0.063a
Tiempo de incubación 90 días	0.048e	0.056cde	0.059cde	0.049de	0.054cde	0.057cde	0.065bcd	0.079ab	0.058b
Medias de dosis carbón	0.048e	0.049de	0.059cd	0.050de	0.061bc	0.066bc	0.070 b	0.082 a	
CV (%):	11.78922								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0025*								
Interacción (D*T):	0.0002*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

6.7.Efecto del residuo del residuo de carbón vegetal en la MO del suelo

El análisis de varianza para la materia orgánica en el suelo muestra, diferencias significativas tanto en dosis de carbón aplicada, como el tiempo de incubación y la interacción. Con un coeficiente de variación de 6.5 el cual se considera aceptable (Cuadro 13). La prueba de medias indica que el suelo respondió significativamente a la adición de dosis crecientes de residuo de carbón vegetal. El incremento mayor de MO fue al aplicar 40 t ha⁻¹. El tiempo de incubación también incremento significativamente la MO. Algunos estudios indican que el carbón pirogénico desempeña un papel especialmente importante en la dinámica de la materia orgánica de los suelos antropogénicos en donde han sido encontrados en altas proporciones mayores (Glaser *et al.*, 2000). El aumento significativo de la materia orgánica con la adición del residuo de carbón vegetal puede ser debido a la acumulación de MO derivada del carbón y a que el carbón vegetal presenta cantidades significativas de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. El aumento significativo de la materia orgánica con la adición del residuo de carbón vegetal puede ser debido a la acumulación de MO derivada

del carbón y a que el carbón vegetal presenta cantidades significativas de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Lo que podría confirmar que los materiales pirógenos pueden ser fuentes importantes de la formación de humus de alto peso molecular (Trompowsky *et al.*, 2005). Si se comparan los valores con lo establecido por la NOM-021-RECNAT (2001), el porcentaje de materia orgánica en el suelo es alto.

Cuadro 13. Materia orgánica del suelo (MO %) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efecto factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	4.03e	4.03e	4.03e	3.88e	3.88e	4.23bcde	4.21bcde	4.18dce	4.06 b
Tiempo de incubación 90 días	4.13de	4.44bcde	4.46bcde	4.28bcde	4.74abcd	4.82ab	4.79abc	5.28a	4.62 a
Medias de dosis carbón	4.08 c	4.24 c	4.25 ve	4.08 c	4.31 bc	4.53 ab	4.50 ab	4.73 a	
CV (%):	6.503481								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
interacción (D*T):	0.0090*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

6.8.Efecto del residuo del residuo del carbón vegetal en el carbono orgánico (CO) del suelo

El análisis de varianza para el carbono orgánico del suelo (CO) muestra diferencia estadística entre las diferentes dosis de carbón, el tiempo de incubación y la interacción de ambos factores, con un coeficiente de variación de 6.5 % el cual es indicativo de la buena precisión alcanzada (Cuadro 14).

Cabe hacer notar que el cálculo que el método para determinar la MO es el mismo que estima el CO, por lo que el comportamiento del ANOVA para CO es similar al de la MO. De esta manera la comparación de medias muestra que, igual que en el caso de la MO, la dosis más alta de 40 t ha⁻¹, aumentó significativamente el CO del suelo hasta 2.74 %, en comparación con el testigo que tuvo 2.37 por ciento, tomando en cuenta los 90 días de incubación también se obtuvo un aumento de carbono (Cuadro 14). Esto se explica por lo que menciona Amonette. (2009) que el biochar es un carbón con alto contenido de carbono orgánico, altamente resistente a la descomposición, por lo que funciona como un almacén de carbono recalcitrante al ser aplicado al suelo. Resultados similares fueron observados por Laird *et al.* (2010) donde reportaron que la adición de carbón

vegetal al suelo, aumento significativamente el contenido total de C después de una incubación de 500 días.

6.9. Efecto del residuo de carbón vegetal en el nitrógeno total (Nt) del suelo

En el análisis de varianza para el nitrógeno total del suelo (Cuadro 15), no se observaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno total (Nt) mostrándose sin cambios con respecto a la aplicación de las diferentes dosis de residuo de carbón vegetal, el tiempo de incubación y, por consiguiente, la interacción de ambos factores. Es evidente que el N total del suelo no respondió en ninguna de las dosis aplicada a la enmienda del residuo de carbón vegetal. Esto se explica por la recalcitrancia de este material adicionado. Lehmann y Joseph., (2009) y Major *et al.*, (2010), han reportado al biochar como un probable sumidero potencial de óxidos de nitrógeno y carbón. Incluso el biochar puede limitar la disponibilidad de N en suelos deficientes en N debido a la alta relación C/N (Lehmann *et al.* 2002). Si se comparan los valores con lo establecido por la NOM-021-RECNAT (2001), se observa que se conserva que el nitrógeno total se conserva bajo después de la adición e incubación con residuo de carbón vegetal adicionado.

6.10. Efecto del residuo de carbón vegetal en la relación C/N del suelo

El análisis de varianza para la relación C/N del suelo (Cuadro 16), establece que no hubo diferencias significativas entre las diferentes dosis aplicadas de residuo de carbón vegetal, sin embargo se observa diferencias significativas en el tiempo de incubación. No hay significancia en la interacción de ambos factores. El coeficiente de variación fue de 15.52 %

De acuerdo con la prueba de medias de Tukey se observa significancia estadística para el tiempo de incubación teniendo un valor más alto de la relación C/N (41.59 %) al final de la incubación (90 días) contra 36.83 % a los 45 días (Cuadro 16). Al respecto Hamer *et al* (2004) mencionan que el biochar es una fuente de carbón muy estable por lo que su relación C/N es alta. Si bien al ser el carbón vegetal un material con alto contenido de carbono, en los porcentajes presentes de este elemento en los biochares, también influye de manera importante la temperatura de pirolisis y la estructura química de la materia utilizada. Otro aspecto importante es que el carbón vegetal está compuesto de estructuras aromáticas altamente condensadas y físicamente resistente a la degradación (Novak *et al.*, 2010). Entonces el suelo con enmienda de carbón muestra una organización más que una mineralización, si se compara los valores con lo establecido por Salgado

et al (2013), se observa que estos son altos. Por lo que los tratamientos podrían considerarse como almacenes de carbono pero con poca mineralización, lo cual afectaría la fertilidad del mismo (Deenik *et al.* (2010).

Cuadro 14. Carbono orgánico (CO) del suelo (%) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	T	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	2.34e	2.34e	2.34e	2.25e	2.25e	2.45bcde	2.44bcde	2.42cde	2.35 b
Tiempo de incubación 90 días	2.39de	2.57bcde	2.59bcde	2.48bcde	2.75abcd	2.79ab	2.78abc	3.06a	2.68 a
Medias de dosis carbón	2.37 c	2.45 bc	2.46 bc	2.37 c	2.50 bc	2.62 ab	2.61 ab	2.74 a	
CV (%):	6.5060								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0090*								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 15 Nitrógeno total (Nt %) del suelo con diferentes dosis de residuos de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	T	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	0.060a	0.061a	0.064a	0.061a	0.062a	0.062a	0.071a	0.075a	0.064 a
Tiempo de incubación 90 días	0.065a	0.055a	0.064a	0.074a	0.071a	0.065a	0.065a	0.067a	0.066 a
Medias de dosis carbón	0.62900 a	0.058 a	0.064a	0.067 a	0.067a	0.064 a	0.068 a	0.071 a	
CV (%):	14.64190								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.1395 n.s.								
Tiempo de incubación:	0.5713 n.s.								
Interacción (D*T):	0.1815 n.s.								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 16. Relación C/N del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	39.62a	38.59a	36.74a	37.24a	36.16a	39.33a	34.35a	32.4a	36.83b
Tiempo de incubación 90 días	36.6a	46.29a	43.11a	34.87a	39.93a	43.29a	42.53a	46.1a	41.59a
Medias de dosis carbón	38.11a	42.44a	39.92a	36.06a	38.05a	41.31a	38.44a	39.37a	
CV (%):	15.5239								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.3754sn								
Tiempo de incubación:	0.009*								
Interacción (D*T):	0.0634sn								

Medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

6.11. Efecto del residuo de carbón vegetal en el fósforo extractable de la combinación o mezcla del suelo con residuos de carbón del suelo

El análisis de varianza realizado para fósforo extraíble del suelo (cuadro 17), muestra que las dosis de residuo de carbón vegetal tiene un efecto significativo sobre el fósforo extractable o extraíble del suelo. Sin embargo en el tiempo de incubación no se tuvo diferencia significativa, ni tampoco con la interacción de ambos factores. El coeficiente de variación del experimento fue de 7.42 %, el cual se considera adecuado para las condiciones experimentales. La prueba de Tukey indica diferencias significativas en el contenido de fósforo, el cual tendió a disminuir al aumentar las dosis de residuo de carbón vegetal. Al respecto esto podría implicar que hubiese una fijación química con los óxidos de aluminio y hierro que existen en el suelo, dada su clasificación Palma-López et al., (2007) han reportado altas cantidades de hierro y aluminio en forma de sesquióxidos en los suelos Acrisoles así como una alta fijación de fosforo. Comparando los valores por la NOM-021-RECNAT (2001) está en un rango medio.

Cuadro 17. Fósforo extractable (mg kg^{-1}) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha^{-1})								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	9.62a	8.15b	8.6ab	8.23ab	8.15b	8.69ab	8.58ab	8.74ab	8.60 a
Tiempo de incubación 90 días	9.02ab	8.74ab	8.22ab	8.22ab	8.19b	8.13b	8.39ab	8.62ab	8.44 a
Medias de dosis carbón	9.32 a	8.44 ab	8.41 ab	8.23 b	8.17b	8.41ab	8.48ab	8.68 ab	
CV (%):	7.42593								
Prueba de F para:									
Dosis de carbón:	0.0052*								
Tiempo de incubación:	0.2792sn								
interacción (D*T):	0.5063sn								

Las medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

6.12. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre la acidez intercambiable y aluminio intercambiable del suelo

Acidez intercambiable. El análisis de varianza para la acidez intercambiable (cuadro 18), muestra diferencias significativas tanto en la adición de diferentes dosis de residuo de carbón vegetal, como en el tiempo de incubación. Sin embargo, no muestra diferencias significativas en la interacción de ambos factores. Presenta un coeficiente de variación de 20.5 % el cual se considera alto. Según la prueba de Tukey las medias de la acidez intercambiable en el suelo son diferentes estadísticamente tanto en el tiempo de incubación y las dosis de residuo de carbón vegetal. Es decir existió un efecto positivo de las dosis del carbón vegetal sobre la acidez intercambiable ya que ésta

disminuye conforme se aumenta la dosis; en el caso del tiempo de incubación, este provocó un incremento significativo de la acidez intercambiable (Cuadro18).

Aluminio intercambiable. El aluminio intercambiable muestra diferencias significativas con las diferente dosis de residuo de carbón vegetal, sin embargo en el tiempo de incubación no responde de la misma manera, pero si hay significancia en la interacción de los factores. Asimismo presenta un coeficiente de variación de 36.11 % (cuadro19) el cual es considerado alto.

Cuadro 18. Acidez intercambiable (cmol (+) kg⁻¹) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	0.53a	0.41a	0.47a	0.37a	0.35a	0.26a	0.28a	0.24a	0.36b
Tiempo de incubación 90 días	0.53a	0.41a	0.53a	0.37a	0.39a	0.39a	0.36a	0.30a	0.41a
Medias de dosis Carbón	0.53a	0.41bc	0.50ab	0.37cd	0.37cd	0.33cd	0.32cd	0.27d	
CV (%):	20.5682								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0142*								
Interacción (D*T):	0.6260sn								

Las medias con la misma literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 19. Aluminio intercambiable (cmol (+) kg⁻¹) del suelo con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo incubacion45 días	0.39a	0.33ab	0.35ab	0.29abcd	0.18bcd	0.10d	0.10d	0.12cd	0.23a
Tiempo incubación 90días	0.31abc	0.16bcd	0.29abcd	0.22abcd	0.20abcd	0.16bcd	0.31abc	0.20abcd	0.23a
Medias de dosis carbón	0.35a	0.24 abcd	0.32ab	0.26abc	0.19cd	0.13d	0.20bc	0.16cd	
CV (%):	36.11								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.9990sn								
Interacción (D*T):	0.0002*								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

En los resultados se muestra que la adición de residuo de carbón vegetal disminuye la acidez intercambiable y el aluminio intercambiable (Cuadros 18 y 19).

Resultados similares obtuvieron Yuan et al. (2011b), quienes mencionan que el aluminio intercambiable y la acidez intercambiable disminuyeron al aplicar biochar al suelo, lo cual es atribuido al aumento al aumento de las bases Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ provenientes del biochar y a la

capacidad de intercambio catiónico. Los mismos autores mencionan que las sustancias alcalinas del biochar son liberadas en el suelo y que neutralizan la acidez. Otros autores como Steiner *et al.* (2007), Chan *et al.* (2008), Novak *et al.* (2009), mencionan que por lo general el biochar tiene propiedades básicas las cuales actúan disminuyendo el Al intercambiable del suelo.

6.13. Efecto del residuo de carbón vegetal sobre las bases intercambiables del suelo

Calcio. El análisis de varianza para el Ca^{+2} del suelo (Cuadro 20), muestra diferencias estadísticas significativa tanto el tiempo de incubación como a las diferentes dosis de residuo de carbón vegetal enmendado al suelo, así como a su interacción. Muestra un coeficiente de variación de 13.16 % el cual se considera adecuado para las condiciones experimentales. La comparación de medias hecha con la prueba de Tukey, indica que las diferentes dosis de carbón aplicadas al suelo incrementaron el Ca^{+2} conforme se fue aumentando la dosis. Mientras que el tiempo de incubación presenta una tendencia contraria y significativa, ya que disminuye el Ca^{+2} a los 90 días.

Magnesio. En el análisis de varianza para el Mg^{+2} se puede observar que la adición de las diferentes dosis de residuos de carbón vegetal tiene un efecto significativo sobre el incremento de Mg, sin embargo, con el tiempo de incubación presenta un efecto significativo disminuyendo el Mg del suelo conforme pasa el tiempo (Cuadro 21). El coeficiente de variación fue de 12.81 % el cual se considera aceptable. La comparación de medias muestra que el tratamiento que más incrementó el Mg fue el equivalente a 40 t ha^{-1} , sin embargo la incubación a 90 días reduce el contenido de Mg intercambiable en el suelo.

Sodio. El análisis de varianza realizado para el Na intercambiable (Cuadro 22) no muestra efecto con la aplicación de las dosis de carbón, sin embargo se observa diferencia significativa con el tiempo de incubación, reduciendo los contenidos de Na a los 90 días. Si se comparan los valores con lo mencionado por Salgado *et al.* (2006) es una concentración que no ocasiona problemas de sodicidad.

Potasio. Con respecto al K intercambiable las dosis de residuo de carbón vegetal tienen efecto significativo sobre K del suelo incrementándolo, mientras que el tiempo de incubación lo disminuye (Cuadro 20).

Cuadro 20. Calcio intercambiable del suelo (cmol (+) kg⁻¹) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	3.31defg	4.06cde	4.27bcd	3.84cdef	4.53bc	5.21ab	4.94bc	6.18a	4.54 a
Tiempo de incubación 90 días	2.33g	2.71g	2.9fg	2.89fg	2.99efg	3.21defg	3.24defg	3.41defg	2.96 b
Medias de dosis Carbón	2.82 d	3.38 cd	3.59 bc	3.36 cd	3.76 bc	4.21 ab	4.09 b	4.79 a	
CV (%):	13.1661								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.002*								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 21. Magnesio intercambiable del suelo (cmol (+) kg⁻¹) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	0.93d	1.11bcd	1.10bcd	0.93d	1.18bcd	1.37abc	1.40ab	1.61a	1.20 a
Tiempo de incubación 90 días	0.88d	0.98d	1.01d	1.07cd	1.04d	1.16bcd	1.12bcd	1.06cd	1.04 b
Medias de dosis carbón	0.9d	1.04cd	1.06cd	1.00cd	1.11bc	1.27ab	1.26ab	1.3a	
CV (%):	12.819								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0002*								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 22. Sodio intercambiable del suelo (cmol (+) kg⁻¹) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	0.18abcde	0.17abcde	0.19abc	0.20a	0.18abcd	0.20ab	0.19abc	0.22a	0.195a
Tiempo de incubación 90 días	0.06f	0.11dcef	0.11cdef	0.10ef	0.07f	0.10def	0.12bcdef	0.09f	0.100 b
Medias de dosis Carbón	0.12 a	0.14a	0.15a	0.15 a	0.13 a	0.15 a	0.16 a	0.15a	
CV (%):	24.730								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.2700sn								
Tiempo de incubación:	0.0001*								
Interacción (D*T):	0.0426*								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Cuadro 23. Potasio intercambiable del suelo (cmol (+) kg⁻¹) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación

Efecto factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo de incubación 45 días	0.46abc	0.56ab	0.54ab	0.42bc	0.54ab	0.64a	0.60ab	0.65a	0.55a
Tiempo de incubación 90 días	0.33c	0.41bc	0.45abc	0.48abc	0.51abc	0.57ab	0.55ab	0.55ab	0.47b
Medias de dosis carbón	0.39c	0.48abc	0.49abc	0.45bc	0.53abc	0.61a	0.57ab	0.60a	
CV (%):	18.57324								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0007*								
Interacción (D*T):	0.3765sn								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

Al adicionar residuo de carbón vegetal hay tendencia de aumento de las bases intercambiable (Ca²⁺, Mg²⁺ Na⁺ y K⁺) ya que éstas provienen del carbón (Wang *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2011). Resultados similares han sido reportados por Steiner. (2007). Otros autores también mencionan que la adición de biochar aumenta el estado de fertilidad de los suelos debido a que el biochar contiene componentes inorgánicos por ejemplo (Ca²⁺, Mg²⁺ Na⁺ y K⁺) que actúan como un agente de encalado (Glaser *et al.*, 2002; Chan *et al.*, 2007; Novak *et al.*, 2009). Sin embargo, es necesario considerar que una de las propiedades de los biochars es la retención de nutrientes, lo que explica que durante el proceso de incubación, algunos de ellos hayan disminuido su concentración con el procedimiento de extracción usado para evaluarlos. Si se comparan los valores con lo establecido por la NOM-021-RECNAT (2001) las bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺), se observa que estos son bajos.

6.14. Efecto del residuo de carbón vegetal en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo

El análisis de varianza para la Capacidad intercambio catiónico (CIC) indica diferencias significativa tanto a las dosis, el tiempo de incubación y la interacción entre ambos factores; con un coeficiente de variación de 9.54 % el cual se considera aceptable (Cuadro 24). El efecto significativo mayor se observó al final de la incubación con dosis aplicada de 40 (t ha⁻¹) obteniendo un promedio de 11.4 cmol (+) kg⁻¹ de suelo (Cuadro 24). Resultados similares fueron observados por Asia *et al.* (2009). para lo cual Cheng *et al.* (2008) mencionan que el biochar presenta cargas superficiales y que con la oxidación progresiva, la carga positiva disminuye y aumentan de carga

negativa. La capacidad de intercambio catiónico a pesar de la enmienda del residuo de carbón vegetal se clasifica como baja (Salgado *et al.*, 2013).

Cuadro 24. Capacidad de intercambio de cationes del suelo (cmol (+) kg⁻¹) con diferentes dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación.

Efectos factoriales	Dosis de residuo de carbón vegetal (t ha ⁻¹)								Media tiempo
	0	10	15	20	25	30	35	40	
Tiempo incubación 45 días	8.7d	10.6abcd	10.0abcd	10.5abcd	11.3abc	12.0ab	12.2a	12.2a	11.0a
incubación 90	9.8bcd	9.6cd	9.8bcd	9.7cd	10.5abcd	10.3abcd	10.48abcd	10.5abcd	10.1b
Medias de dosis carbón	9.3c	10.1abc	9.9bc	10.1abc	10.9ab	11.2ab	11.3ab	11.4 a	
CV (%):	9.54584								
Prueba de f para:									
Dosis de carbón:	0.0001*								
Tiempo de incubación:	0.0003*								
Interacción (D*T):	0.0373								

Las medias con las mismas literal en la hilera o columna son iguales estadísticamente de acuerdo con (Tukey ≤ 0.05)

VII. CONCLUSIONES

El suelo cultivado con caña de azúcar es un suelo Acrisol Férrico (Arcílico, Cutánico), que representa baja fertilidad.

El residuo de carbón vegetal es un material que contiene cantidades importantes de carbono, nitrógeno, cationes intercambiables, capacidad intercambio catiónico y fósforo extraíble. Presenta también un pH alcalino y baja porosidad. En el caso de las bases intercambiables el catión K^+ es considerado como muy alto.

Al aplicar residuos de carbón vegetal en el suelo cultivado con caña de azúcar, mejoró las propiedades físicas, tanto en el aumento de la capacidad de campo como el punto de marchitez permanente manteniendo una densidad aparente apropiada, que ayudó a mejorar el porcentaje de humedad aprovechable para el suelo. En cuanto las propiedades químicas del suelo aumentó el pH en H_2O , pH KCL, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} Na^+ y K^+), presentando disminución en fósforo extractable, acidez intercambiable y aluminio intercambiable

El residuo de carbón vegetal no tuvo influencia en el nitrógeno total ni en la relación C/N. sin embargo el CO aumentó.

El residuo de carbón vegetal parece ser una buena enmienda orgánica al suelo ya que incrementa la disponibilidad de nutrientes en el suelo Acrisol Férrico (Arcílico, Cutánico), cultivado con caña de azúcar. A pesar de esta enmienda los suelos mezclados con carbón no superan los estándares de fertilidad que recomienda la NOM-021-RECNAT-2002. .

VIII. LITERATURA CITADA

- Amonette, J. 2009. An introduction to Biochar: concept, processes, properties and applications. Pacific Northwest National Laboratory Richland, USA.
- Asai, H., B. K. Samson., H. M. Stephan., K. Songyikhangsuthor., K. Homma., Y. Kiyono., T. Horie. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos Soil physical properties leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111: 81-84.
- Al-Wabel, M. I., Al-Omran, A., El-Naggar., A. H., M. Nadeem. 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology* 131:374-379.
- Abdollahi, M. 2014. Charcoal. Reference module in biomedical sciences 1: 779-781.
- Baldock, J. A., y R. J. Smernik 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33:1093-1109.
- Borson, M. L., J. B. Howard., J. P Longwell., W. A Peters. 1989. Heterogeneous Cracking of Wood Pyrolysis Tars over Fresh wood char surfaces. *Energy & Fuels* 3: 735-740.
- Bautista, F., G. Palacio. 2005. Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.
- Břendová, K., P. Tlustoš., J. Száková., y J. Habart. 2012. Biochar properties from different materials of plant origin. *Eur. Chem. Bull* 12(1): 535-539.
- Carrasco Lourtau, A. M., M. P. Rubio Montero., y M. Jurado Vargas. Characterization of coal and charcoal by alpha-particle and gamma-ray spectrometry. *Radiation Physics and Chemistry*. Revisado en Marzo de 2015, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.12.013>
- Carter, M. R. 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions. *AGRONOMY JOURNAL* 94: 38-47.

- Cheng, C.-H., J. Lehmann., y M. H. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 1598-1610.
- Chidumayo, E. N., y D. J. Gumbo. 2013. The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the. *Energy for Sustainable Development* 17: 86-94.
- CHUN, Y., G.SHENG., C. T. CHIOU., y B. XING. 2004. Compositions and Sorptive properties of Crop residue-derived chars. *Environ Sci Technol* 38: 4649-4655.
- Deenik, J. L., M. J. Antal Jr., y S. Campbell. 2010. Charcoal Volatile Matter Content Influences Plant Growth and Soil Nitrogen Transformations. *Soil Fertility & Plant Nutrition* 74(4): 1259-1270.
- Downie, A. E., L. V. Zwieten., R. J.Smernik., S.Morris., y P. R.Munroe. 2011. TerraPretaAustralis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture Ecosystems and Environment* 140 : 137-147.
- Francioso, O., S. Sanchez-Cortes., S. Bonora., M. L. Roldán., C. Giacomo. 2011. Structural characterization of charcoal size-fractions from a burnt *Pinus pinea* forest by FT-IR, Raman and surface-enhanced Raman spectroscopies. *Journal* 994: 155-162.
- FAO. (1983). *Metodos simples para fabricar carbon vegetal*. Direccion de recursos forestales, departamentos de Montes. FAO- Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. Roma, Italia. Recuperado el 19 de Marzo de 2015, de <http://www.fao.org/docrep/x5328s/x5328s00.htm>
- Fellet, G., L.Marchiol., G.Delle., V. A. Peressotti. 2011. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation. *Chemosphere* 83: 1262-1267.
- Gilbert, P., C.Ryu., V. Sharifi., y J. Swithenbank., 2009. Tar reduction in pyrolysis vapours from biomass over a hot char bed. *Bioresource Technology* 100: 6045-6051.
- Glaser , B., J. Lehmann., y W.Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biol Fertil Soils* 35 : 219-230.

- Glaser, B. 2007. Prehistorically modified soil of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical transactions of the royal society* 362 : 187-196.
- Glaser, B., y J. J. Birk. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82 : 39-51.
- Glaser, B., E. Balashov., L. Haumaier., G. Guggenberger., W. Zech. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon Region. *Organic Geochemistry* 31: 669-678.
- Glaser, B., L. Haumaier., G. Guggenberger., W. Zech. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture. *Naturwissenschaften* 88: 37-41.
- Han, Y., A. A. Boateng., P. X. Qi., I. M. Lima., J. Chang. 2013. Heavy metal and adsorptive properties of biochars from pyrolyzed switchgrass and woody biomass in correlation with surface properties. *Journal of Environmental Management* 1, 118: 196-204.
- Hamer, U., B. Marschner., S. Brodowski., W. Amelung. 2004. Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation. *Organic Geochemistry* 35: 823-830.
- Hammes, K., R. J. Smernik., J. O. Skjemstad., M. W. Schmidt. 2008. Characterisation and evaluation of reference materials for black carbon analysis using elemental composition, colour, BET surface area and C NMR spectroscopy. *Applied Geochemistry* 23:2113-2122.
- Hatcher, P. G., y D. J. Clifford. 1997. The organic geochemistry of coal: from plant materials to coal. *Org. Geochem* 27 : 251-274.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Joseph, S. D., M. Camps-Arbestain., Y. Lin., P. Munroe., C. H. Chia., J. Hook., J. E. Amonette. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research* 48: 501-515.

- Karhu, K., T. Mattila., R.Bergström.,y K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture Ecosystems and Environment* 140 : 309-313.
- Jr, M. J., y M. Grønli. 2003. The Art, science, and technology of charcoal production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42: 1619-1640.
- Julca-Otiniano, A., L. Meneses-Florian., R. Blas-Sevillano., S. Bello-Amez. 2006. La materia organica, importancias y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA (Chile)*, 24(1): 49-61.
- Kloss, S., F. Zehetner., A. Dellantonio., R.Hamid., F. Ottner., V.Liedtke., G.Soja ., (2012). Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Eff ects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties. *Journal of Environmental Quality* 41 : 990-1000.
- Kumar, S., R. E. Masto., L. C. Ram., P.Sarkar., J. George., V. A. Selvi. 2013. Biochar preparation from *Parthenium hysterophorus* and its potential use in soil application. *Ecological Engineering* 55: 67-72.
- Laird , D. A., P. Fleming., D. D. Davis., R. Horton., B.Wang., D. L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443-449.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Front Ecol Environ* 5: 381-387.
- Lehmann, J., y S. Joseph. 2009. Biochar for Environmental Management In *Science and Technology* (Vol. 11). Earthscan, London 448 p.
- Lehmann, J., J. Gaunt., y M. Rondon. 2006. BIO-CHAR SEQUESTRATION IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS–AREVIEW. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403-427.
- Lehmann, J., M. C. Rillig. J.Thies., C. A.Masiello., W. C.Hockaday., D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota -A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 1812-1836.

- Lehmann, J., P.Silva Jr., C. Steiner., T. Nehls., W. Zech., B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343-357.
- Luo, L., X. Cui., W. Binbin., J. Hou., B. Xun., Y. Chen. 2011. Sorption and desorption of pentachlorophenol to black carbon of three different origins. *Journal of Hazardous Materials* 185: 639-646.
- Laird, D. A., P. Fleming., D. D. Davis., R.Horton., B.Wang., D. L.Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158 :443-449.
- Lehmann, J. (2009). Terra Preta de Indio. *Encyclopedia of Soil Science* 1(1): 1-4.
- Lima, H. N., C. E. Schaefer., J. E Mello., R. J.Gilkes., J. Ker, b. 2002. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* 110: 1-17.
- Mankasingh, U., P. C. Choi., y V.Ragnarsdottir. 2011. Biochar application in a tropical, agricultural region: A plot scale study in Tamil Nadu, India. *Applied Geochemistry* 26 : 5218-5221.
- Major, J., M.Rondon., D. Molina., S. J. Riha., J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil* 333: 117-128.
- Masto, R. E., M. A. Ansari J, George, J., V. A Selvi., L. C.Ram. 2013. Co-application of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays*. *Ecological Engineering* 58 : 314-322.
- Mukherjee, A., y R. Lal. 2013. Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy* 3: 313-339.
- Mukherjee, A., A. R. Zimmerman., y W. Harris. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163: 247-255.
- Navarro , P. J., H. Moral., L. Gomez., B. Mataix. 1995. Resúdos orgánicos y agricultura. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones. Alicante. España, 108 pp.

- Novak, J. M., W. J. Busscher., D. W. Watts., D. A. Laird., Ahmedna M. A., M. A. Niandou. 2010. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandudult. *Geoderma* 154: 281-288.
- Novak, J. M., I. Lima., B. Xing., J. W. Gaskin., C. Steiner., K. C. Das., H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3:195-206.
- Ortiz V., B., y C. A. Ortiz Solorio. 1980. *Edafologia* (3.ed) Universidad autonoma de Chapingo Mexico 329 p.
- Norma oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis
- Palma-Lopez, D. J., J. Cisneros., E. Moreno., J. A. Rincon. 2006. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco (3 ed.). ISPROTAB-FUNDACION PRODUCE TABASCO-COLEGIO DE POSTGRADUADOS: Villahermosa ,Tabasco,Mexico. 196p.
- Palma-Lopez, D. J., y J. Cisneros Dominguez. 2002. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco (2 ed.). ISPROTAB-FUNDACION PRODUCE TABASCO-COLEGIO DE POSTGRADUADOS VILLAHERMOSA TABASCO MEXICO 118 P.
- Peng, X., L. L. Ye., C. H. Wang., H. Zhou., B. Sun. 2011. Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ustisol in southern China. *Soil & Tillage Research* 112:159-166.
- Piccolo, A., G. Pietramellara y J. S. Mbagwu. 1997. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma* 75:267-277.
- Porta, J., M. Lopez-Acevedo., y R. M. Poch. 2008. *Introduccion a la Edafologia uso y proteccion del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa Madrid 451 p.
- Rajkovich, S., A. Enders., K. Hanley., C. Hyland., A. R. Zimmerman., J. Lehmann. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biol Fertil Soils*.
- Rubio Montero, M. P., C. J. Duran Valle., M. Jurado Vargas., A. Botet Jimenez. 2009. Radioactive content of charcoal. *Applied Radiation and Isotopes* 67: 953-956.

- Schauczenski, J. B. (2010). Biochar and Sustainable Agriculture. ATTRA—National Sustainable Agriculture Information Service • 1-800-346-9140.
- Shenbagavalli, S., y S. Mahimairaja. 2012. PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR FROM DIFFERENT BIOLOGICAL WASTES. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* 2: 197-201.
- Shenbagavalli, S., y S. Mahimairaja. 2012. Production and characterization of biochar from different biological wastes. *IJPAES* 2:197-201.
- Salgado G, S., D. J Palma Lopez., J. Zabala C., L. Lagunes E., M. Castelan E., C. F. Ortiz G., J. A. Rincon R . 2006. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Pujilic. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H.Cardenas ,Tabasco,Mexico. 105p.
- Salgado G, S., D. J. Palma-Lopez., M. Castelan-Estrada., L. Lagunes E., H. Ortiz L. 2013. Manual para muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretacion de analisis para la produccion sostenible de alimentos. Colegio de Postgraduado -Campus Tabasco. H. Cardenas, Tabasco, Mexico. 101p.
- Schmidt, M., A. R. Py-Daniel., C. Moraes., R. B.Valle., C. F. Caromano., W. G.Texeira., M. J. Heckenberger. 2014. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: a widespread pattern of anthrosol formation. *Journal of Archaeological Science* 42: 152-165.
- Serrano-Mendrano, M., T. Arias-Chalico., A. Ghilardi., O. Masera. 2014. Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption. *Energy for Sustainable Development* 19: 39-46.
- Sohi, S. P., E. Krull., E. Lopez-Capel y R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105:47-82.
- Staff Soil Survey. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales 365p.
- Swami, S. N., C. Steiner., W. Teixeira., y J. Lehmann. 2009. Charcoal Making in the Brazilian Amazon: Economic aspects of Production and carbon conversion efficiencies of kilns. In:

- Woods, W. I., W. G. Teixeira., J. Lehmann., C. Steiner., L. Rebellato. Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision, 411-422 p.
- Thompson, L. M., y Troeh., 1988. Los suelos y su fertilidad (4 ed.). Reverté, S.A. Centro Pirenaico de Biología Experimental de Jaca. Consejo superior de Investigaciones Científicas Barcelona. 629 p.
- Trompowsky, P. M., V. Benites., B. E. Madari., A. S. Pimenta., W. C. Hockaday., P. G. Hatcher. 2005. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. *Organic Geochemistry* 36: 1480-1489.
- Tryon, E. H. 1948. Effect of Charcoal on Certain Physical Chemical and Biological Properties of Forest Soils. *Ecological Society of America* 18(1): 81-115.
- Uchimiya, M., L. H. Wartelle., K. Thomas Klasson., C. A. Fortier., I. M. Lima, (2011). Influence of Pyrolysis Temperature on Biochar Property and Function as a Heavy Metal Sorbent in Soil. *J. Agric. Food Chem* 59 : 2501-2510.
- Verheijen, F., F. G. Verheijen., M. Van der Velde., A. C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment* 144: 175-187.
- Wang, N., J.-Y. Li. y R.-K. Xu. 2009. Use of agricultural by-product to study the effects in an acid tea garden soil. *Soil Use and Management* 25: 128-132.
- Warnock, D. D., J. Lehmann., T. W. Kuyper. M. C. Rillig. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms. *Plant Soil*: 300, 9-20.
- Wang, T., M. Camps-Arbestain., M. Hedley., y P. Bishop. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant Soil* 357: 173-187.
- Xu, G., L. L. Wei., J. N. Sun., H. B. Shao., X. S. Chang. 2013. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism?. *Ecological Engineering* 52: 119-124.
- Yuan, J.-H., y R.-K. Xu. 2011a. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management* 27: 110-115.

Yuan, J.-H., R.-K. Xu., y H. Zhang. 2011b. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology* 102: 3488-3497.

Zavalloni, C., G. Alberti., S. Biasiol., G. D. Vedove., F. Fornasier., J.Liua., A. Peressotti., 2011. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Applied Soil Ecology* 50: 45-51.

IX. ANEXOS



Anexo 1. Construcción de la carbonera artesanal



Anexo 2. Inicio del proceso de producción de la carbonera artesanal



Anexo 3. Al termino del proceso de producción de la carbonera



Anexo 4. Carbón listo para encostalar



Anexo 5. Carbón encostalado para trasladarlo al centro de acopio



Anexo 6. Residuo de carbón que queda en el área de producción



Anexo 7. Traslado del carbón al centro de acopio



Anexo 8. Don Elizandro dueño de la empresa el Cocoyte



Anexo 9. Resto de carbón pasando por una criba en el centro de acopio



Anexo 10. Residuo de carbón encostalado en el centro de acopio



Anexo 11. Residuo de carbón del centro de acopio

ANALISIS DE VARIANZA DE LAS VARIABLES EN ESTUDIO SOBRE EL EFECTO DEL RESIDUO DE CARBON EN EL SUELO ACRISOL

Sistema SAS

Información de nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
DOSIS	8	0 10 15 20 25 30 35 40
TIEMPO	2	45 90

Número de observaciones leídas 80

Número de observaciones usadas 80

Variable dependiente: capacidad de campo (CC)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	357.3290073	23.8219338	41.70	<.0001
Error	64	36.5625776	0.5712903		
Total corregido	79	393.8915849			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CC Media
0.907176	3.539864	0.755837	21.35216

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	324.5230256	46.3604322	81.15	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TIEMPO	1	21.6809076	21.6809076	37.95	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	11.1250741	1.5892963	2.78	0.0137

Variable dependiente: Punto de marchitez permanente (PMP)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	137.6211208	9.1747414	44.53	<.0001
Error	64	13.1854404	0.2060225		
Total corregido	79	150.8065612			

R-cuadrado Coef Var Raíz MSE PMP Media
0.912567 4.141623 0.453897 10.95940

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	109.4439356	15.6348479	75.89	<.0001
TIEMPO	1	18.1756178	18.1756178	88.22	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	10.0015674	1.4287953	6.94	<.0001

Variable dependiente: Humedad aprovechable (Ha)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	146.5387792	9.7692519	18.06	<.0001
Error	64	34.6283428	0.5410679		
Total corregido	79	181.1671219			

R-cuadrado Coef Var Raíz MSE Ha Media
0.808860 7.077770 0.735573 10.39273

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	63.67951815	9.09707402	16.81	<.0001
TIEMPO	1	79.56060500	79.56060500	147.04	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	3.29865600	0.47123657	0.87	0.5343

Variable dependiente: Densidad aparente (Da)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.60595489	0.04039699	14.30	<.0001
Error	64	0.18082760	0.00282543		
Total corregido	79	0.78678249			

R-cuadrado **Coef Var** **Raíz MSE** **Da Media**
 0.770168 4.942964 0.053155 1.075363

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.14435079	0.02062154	7.30	<.0001
TIEMPO	1	0.45075031	0.45075031	159.53	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.01085379	0.00155054	0.55	0.7942

Variable dependiente: pH

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.85962000	0.05730800	131.18	<.0001
Error	64	0.02796000	0.00043688		
Total corregido	79	0.88758000			

R-cuadrado **Coef Var** **Raíz MSE** **pH Media**
 0.968499 0.406605 0.020902 5.140500

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.61886000	0.08840857	202.37	<.0001
TIEMPO	1	0.06844500	0.06844500	156.67	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.17231500	0.02461643	56.35	<.0001

Variable dependiente: pH KCl

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.71534875	0.04768992	138.48	<.0001
Error	64	0.02204000	0.00034438		
Total corregido	79	0.73738875			

R-cuadrado **Coef Var** **Raíz MSE** **pH KCL Media**
 0.970111 0.436092 0.018557 4.255375

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.43195875	0.06170839	179.19	<.0001
TIEMPO	1	0.24310125	0.24310125	705.92	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.04028875	0.00575554	16.71	<.0001

Variable dependiente: Conductividad eléctrica (CE)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.01241469	0.00082765	15.93	<.0001
Error	64	0.00332480	0.00005195		
Total corregido	79	0.01573949			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CE Media
0.788761	11.78922	0.007208	0.061138

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.01015559	0.00145080	27.93	<.0001
TIEMPO	1	0.00051511	0.00051511	9.92	0.0025
DOSIS*TIEMPO	7	0.00174399	0.00024914	4.80	0.0002

Variable dependiente: Materia Orgánica (MO)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	11.50907915	0.76727194	9.61	<.0001
Error	64	5.10924080	0.07983189		
Total corregido	79	16.61831995			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	MO Media
0.692554	6.503481	0.282545	4.344525

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	3.63450675	0.51921525	6.50	<.0001
TIEMPO	1	6.20720820	6.20720820	77.75	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	1.66736420	0.23819489	2.98	0.0090

Variable dependiente: Carbono orgánico (CO)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	3.87233140	0.25815543	9.60	<.0001
Error	64	1.72040040	0.02688126		
Total corregido	79	5.59273180			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CO Media
0.692386	6.506023	0.163955	2.520050

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	1.22221160	0.17460166	6.50	<.0001
TIEMPO	1	2.08916480	2.08916480	77.72	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.56095500	0.08013643	2.98	0.0090

Variable dependiente: Relación C/N

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	1266.570519	84.438035	2.28	0.0119
Error	64	2372.033486	37.063023		
Total corregido	79	3638.604005			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CN Media
0.348092	15.52398	6.087941	39.21638

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	284.7971139	40.6853020	1.10	0.3754
TIEMPO	1	452.5143845	452.5143845	12.21	0.0009
DOSIS*TIEMPO	7	529.2590203	75.6084315	2.04	0.0634

Variable dependiente: Nitrógeno total (Nt)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.00206719	0.00013781	1.49	0.1359
Error	64	0.00591920	0.00009249		
Total corregido	79	0.00798639			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Nt Media
0.258839	14.63503	0.009617	0.065713

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.00106269	0.00015181	1.64	0.1399
TIEMPO	1	0.00003001	0.00003001	0.32	0.5709
DOSIS*TIEMPO	7	0.00097449	0.00013921	1.51	0.1816

Variable dependiente: Capacidad intercambio catiónico (CIC)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	72.9953922	4.8663595	4.76	<.0001
Error	64	65.3805880	1.0215717		
Total corregido	79	138.3759802			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CIC Media
0.527515	9.545844	1.010728	10.58815

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	41.72430560	5.96061509	5.83	<.0001
TIEMPO	1	14.82986420	14.82986420	14.52	0.0003
DOSIS*TIEMPO	7	16.44122240	2.34874606	2.30	0.0373

Variable dependiente: Fosforo extraible (P)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	12.11708519	0.80780568	2.02	0.0275
Error	64	25.64247520	0.40066368		
Total corregido	79	37.75956039			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	FOS Media
0.320901	7.425933	0.632980	8.523913

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	9.09408049	1.29915436	3.24	0.0052
TIEMPO	1	0.47725051	0.47725051	1.19	0.2792
DOSIS*TIEMPO	7	2.54575419	0.36367917	0.91	0.5063

Variable dependiente: Acidez intercambiable (AI)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.63818515	0.04254568	6.54	<.0001
Error	64	0.41612760	0.00650199		
Total corregido	79	1.05431275			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	AC Media
0.605309	20.56358	0.080635	0.392125

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.56264095	0.08037728	12.36	<.0001
TIEMPO	1	0.04131405	0.04131405	6.35	0.0142
DOSIS*TIEMPO	7	0.03423015	0.00489002	0.75	0.6291

Variable dependiente: Aluminio intercambiable (Al I)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.63559099	0.04237273	5.80	<.0001
Error	64	0.46766800	0.00730731		
Total corregido	79	1.10325899			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	ALI Media
0.576103	36.12777	0.085483	0.236613

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.39310449	0.05615778	7.69	<.0001
TIEMPO	1	0.00000001	0.00000001	0.00	0.9990
DOSIS*TIEMPO	7	0.24248649	0.03464093	4.74	0.0002

Variable dependiente: Calcio (Ca²⁺)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	82.42244875	5.49482992	22.49	<.0001
Error	64	15.63772000	0.24433938		
Total corregido	79	98.06016875			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Ca Media
0.840529	13.16616	0.494307	3.754375

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	25.98475875	3.71210839	15.19	<.0001
TIEMPO	1	50.26035125	50.26035125	205.70	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	6.17733875	0.88247696	3.61	0.0024

Variable dependiente: Magnesio (Mg²⁺)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	2.81099500	0.18739967	8.99	<.0001
Error	64	1.33408000	0.02084500		
Total corregido	79	4.14507500			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Mg Media
0.678153	12.81935	0.144378	1.126250

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	1.58237500	0.22605357	10.84	<.0001
TIEMPO	1	0.53464500	0.53464500	25.65	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.69397500	0.09913929	4.76	0.0002

Variable dependiente: Sodio Na⁺

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.20313875	0.01354258	10.09	<.0001
Error	64	0.08588000	0.00134187		
Total corregido	79	0.28901875			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	Na Media
0.702857	24.73020	0.036632	0.148125

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.01210875	0.00172982	1.29	0.2700
TIEMPO	1	0.18145125	0.18145125	135.22	<.0001
DOSIS*TIEMPO	7	0.00957875	0.00136839	1.02	0.4261

Variable dependiente: Potasio (K⁺)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	0.58728000	0.03915200	4.23	<.0001
Error	64	0.59240000	0.00925625		
Total corregido	79	1.17968000			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	K Media
0.497830	18.57324	0.096209	0.518000

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
DOSIS	7	0.39922000	0.05703143	6.16	<.0001
TIEMPO	1	0.11704500	0.11704500	12.64	0.0007
DOSIS*TIEMPO	7	0.07101500	0.01014500	1.10	0.3765