

VII. Artículo 1. Efecto de la aplicación de biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características de suelo en el rendimiento de maíz (*Zea mays*), en tres texturas de suelo en León, Nicaragua.

Carlos Aker¹, Gabriela Soto², Alejandro Imbach³, Xiomara Castillo⁴, Francisco Garro⁵

¹CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, Agricultura Ecológica; UNAN-LEÓN Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad de ciencia y tecnología, Agroecología: caker@catie.ac.cr; carlos_aker@hotmail.com

²UNA Universidad Nacional De Costa Rica, Escuela de Ciencias Agrarias, Maestría en Agricultura Ecológica. agroecologiauna@gmail.com

³CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, Escuela de Posgrado, Programa de Prácticas del Desarrollo y Prácticas de la Conservación: imbach@catie.ac.cr

⁴UNAN-LEÓN Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Facultad de ciencia y tecnología, Agroecología: castilloxio@yahoo.de

⁵CATIE Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, Cambio Climático: festrada@catie.ac.cr

Resumen.

Se ha demostrado que el biocarbón mejora las propiedades físico-químicas del suelo y los rendimientos de diversos cultivos y que combinado con gallinaza podría reemplazar el uso de los fertilizantes sintéticos para la producción, sin embargo los efectos de esa combinación no han sido estudiados a fondo. En este experimento se estudia el efecto del biocarbón, la gallinaza, los fertilizantes sintéticos y la combinación de los anteriores en tres clases de texturas diferentes (Franco Arenoso, Arenoso Franco y Franco Arcillo Arenoso) en el cultivo de maíz de tres municipios del departamento de León, Nicaragua. Se evaluó la capacidad de retención de humedad medido en % humedad volumétrica utilizando un TDR, velocidad de infiltración de agua, densidad aparente, pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, contenido de nutrientes: calcio, magnesio, potasio, nitrógeno de nitratos, fósforo, peso de chilotes, mazorcas, biomasa de plantas y rendimientos de maíz en mazorca. Los resultados nos indican que el suelo puede llegar a retener hasta un 18% aplicando biocarbón con gallinaza el cual a su vez disminuye la densidad aparente del mismo hasta 0.82, además incrementa el pH en 7.36 y el contenido de macronutrientes del suelo Ca: 324, K: 111, Mg: 35, N: 35, P: 66 (mg/100g); adicional a esto la aplicación de Biocarbón con gallinaza produce resultados positivos al acondicionar los suelos Franco Arcillo Arenosos para permitir un mejor desarrollo radicular de las plantas de maíz e igualar significativamente las propiedades físico-químicas del suelo al igual que los rendimientos del cultivo de maíz en general.

Palabras clave: Biocarbón, gallinaza, humedad, nutrientes, suelo, maíz, raíz.

Abstract

It has been demonstrated that biochar improves soil physical-chemical properties and crop yields, and that mixed with poultry manure could replace the use of synthetic fertilizers for production, perhaps the effects of this combination haven't been studied deeply. In this experiment it is studied the effect of the biochar, poultry manure, synthetic fertilizers and the combination of these in three different textural classes (Sandy Loam, Loamy Sand and Clayey Sandy Loam) in corn crop in three municipalities of the department of León, Nicaragua. Water holding capacity measured as a percentage of water bulk using a TDR, water infiltration rate, bulk density, pH, cationic exchange capacity, organic matter, nutrients contents: calcium, magnesium, potassium, nitrogen from nitrates, phosphorus, baby corn and corn cob weight, plant biomass and corn cob yield have been evaluated. The results indicate that the soil can hold 18% of water in the biochar with poultry manure incorporated to the soil, in which the bulk density went lower at 0.82g/cm^3 , it also increased the pH into 7.36 and the macronutrient content of the soil, Ca: 324, K: 111, Mg: 35, N: 35, P: 66 (mg/100g); additionally to these results, the application of biochar with poultry manure to the soil generates positive results to condition the Clayey Sandy Loam soil, so it can permit a better radicular growing of the corn plants and obtain very much the same significant results with the soil physical-chemical properties and the corn yields in general.

Keywords: Biochar, poultry manure, moisture, nutrients, soil, corn, roots.

Introducción

Los efectos del cambio climático han ocasionado que las lluvias en la región seca del pacífico de León, Nicaragua sean escasas y poco continuas, permitiendo largos períodos de hasta semanas sin recibir precipitaciones, esto ocasiona que muchos de los cultivos de la zona sean abortados y perdidos por marchitez, sumado a esto está la creciente deforestación, este es un efecto que hace pocos años no era muy común en el trópico seco del occidente del país (CATIE-PROLEÑA 2001). Además muy pocos productores cuentan con sistemas de riego que les permitan adaptarse a esta eventualidad (Rapidel y Rodriguez 1990). Las recientes investigaciones realizadas en los países en desarrollo han demostrado que los suelos con un contenido más alto de materia orgánica (Lal 2006; Kimetu *et al.* 2008), y suelos que han recibido aplicaciones de biocarbón incrementan su capacidad de retener nutrientes y agua hasta un 11% (Laird *et al.* 2010; Karhu *et al.* 2011) que suelos que

se manejan de forma convencional, sin aplicaciones de algún tipo de abono orgánico debido a la alta porosidad de las partículas de biocarbón (Major *et al.* 2010; Vaccari *et al.* 2011); esto permite precisamente que la planta cuente con más agua disponible en el suelo para poder absorber nutrientes, desarrollar sus raíces y crecer rápidamente con el objetivo de evitar riesgos por una eventual sequía en medio de una temporada lluviosa, en este tema podemos incluir el efecto de sequía de la canícula para los cultivos de la época de mayor precipitación (Karhu *et al.* 2011).

La fertilidad de los suelos ha sido impactada por las prácticas agrícolas convencionales, las cuales incluyen la aplicación de fertilizantes nitrogenados acelerando la acidificación de los suelos haciendo el suelo menos fértil y aprovechable para la agricultura (Guo *et al.* 2010). Con las adiciones de enmiendas de biocarbón hay mejoras para los suelos en cuanto a características químicas (Lehmann *et*

al. 2003), incrementando los niveles de pH (Xu *et al.* 2012; Novak *et al.* 2009) disminuyendo la necesidad de adicionar fertilizantes nitrogenados al suelo (Widowati *et al.* 2012) mejorando la CIC, incrementando la cantidad de materia orgánica a largo plazo (Liang *et al.* 2006). A su vez el biocarbón siendo un producto orgánico muy estable en el suelo con tendencia a ser mineralizado (Bol *et al.* 2000) demuestra aumentar los contenidos de calcio, magnesio, potasio (Novak *et al.* 2009) la disponibilidad de fósforo y la retención del nitrógeno amoniacal y disminuir su pérdida por lixiviación (Ding *et al.* 2010; Liang *et al.* 2006). Además se encuentra que mejora la porosidad de los suelos lo cual es esencial para el desarrollo radicular de las plantas disminuyendo con el biocarbón la densidad aparente de los suelos (Steiner *et al.* 2007).

Una vez que el biocarbón ha mejorado las condiciones de fertilidad de los suelos, los cultivos empiezan a aprovechar las ventajas de dichas enmiendas. El maíz sigue siendo uno de los principales cultivos agrícolas de autoconsumo y comercio en Nicaragua que a su vez forma parte de la dieta básica de la población (Córdoba *et al.* 2002). La aplicación del biocarbón al suelo ha demostrado mejorar los rendimientos en el cultivo de maíz al paso del tiempo, sin embargo las dosis altas de biocarbón de 20 t ha⁻¹ en una sola aplicación ha señalado tendencias a incrementar los rendimientos de maíz en suelos oxidados (Major *et al.* 2010). La aplicación de biocarbón en suelos maiceros secos, infértiles y pobres en materia orgánica incrementó los rendimientos según Zhang *et al.* (2011). Las enmiendas de biocarbón al suelo permiten que las plantas de maíz puedan incrementar la

absorción de nitrógeno hasta en un 15% comparadas con las fertilizadas completamente con agroquímicos (Rajkovich *et al.* 2011), lo cual indica un mejor aprovechamiento de los nutrientes y menos pérdida en el suelo.

Los investigadores sugieren que el biocarbón debe de ser aplicado en húmedo y junto con otros fertilizantes orgánicos y desechos mismos de la producción agropecuaria para poder observar resultados a corto plazo en los rendimientos de diferentes cultivos (Hua *et al.* 2009). La gallinaza (G) por si sola se le considera como un fertilizante orgánico muy completo en macro y micro nutrientes para el suelo, sin embargo la aplicación de G al suelo sin un material complementario induce a la pérdida de los nutrientes volátiles como el nitrógeno amoniacal, promoviendo a su vez la contaminación ambiental, para esto Steiner *et al.* (2010) comprobó que al aplicar biocarbón durante el proceso de compostaje de la G disminuye las emisiones de gases amoniacales y por supuesto la pérdida de Nitrógeno de la gallinaza haciéndolo una mejor fuente de fertilizante. La combinación del biocarbón con gallinaza o la aplicación de ambos en el mismo suelo han demostrado ser un excelente asocio para incrementar tanto los rendimientos de los cultivos como las propiedades físico-químicas del suelo e impedir la pérdida de nutrientes del mismo (Steiner *et al.* 2007). La eficiencia de la combinación del biocarbón y la gallinaza tanto en rendimientos como en los parámetros de suelo ha sido estudiada recientemente en la región tropical centroamericana en diferentes cultivos mostrando efectos positivos en muchos aspectos, tanto en rendimientos como en la mejora de las propiedades del suelo: Cacao

(*Theobroma cacao* L.) (Hojah *et al.* 2012) en arroz (*Oryza sativa* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L.) (Steiner *et al.* 2007). Los objetivos de esta investigación fueron analizar el impacto del uso del biocarbón en diferentes combinaciones con abonos (testigo, solo biocarbón, biocarbón y gallinaza, fertilizante, biocarbón y fertilizante) de tres texturas diferentes de suelo (Franco Arcillo Arenoso, Arenoso Franco y Franco Arcilloso) en las propiedades físico-químicas del suelo y el rendimiento del cultivo de maíz NB-6 (*Zea mays*) en temporada lluviosa.

Metodología

Descripción del suelo en el área de estudio.

La presente investigación se realizó en nueve fincas, en los municipios de Telica, La Paz Centro y León, todas dentro del departamento de León, Nicaragua en el año 2013. La precipitación promedio durante el período de cultivo en el municipio de La Paz centro fue de 198 mm, en Telica fue de 338 mm, en León fue de 418 mm. Los suelos estudiados pertenecen al orden taxonómico de los inceptisoles y al suborden anthropic por la acción humana: Anthrepts (USDA 2010). En el municipio de Telica se seleccionaron tres fincas con texturas de suelo Arenoso Franco (%Arcilla 11, %Limo 13, %Arena 76), con estructuras granulares muy fino, los cultivos antecesores al experimento eran: yuca (*Manihot esculenta*), ajonjolí (*Sesamun indicum*) y maíz (*Zea mays*); en el municipio de La Paz Centro se seleccionaron tres fincas con texturas de suelo Franco Arcillo Arenoso (%Arcilla 23, %Limo 23, %Arena 54), con estructuras de bloques subangulares gruesos y granular muy grueso, anteriormente se cultivaba maíz y en el municipio de León se seleccionaron tres fincas con texturas de suelo

Franco Arenoso (%Arcilla 8, %Limo 38, %Arena 53), con estructura de suelo granular medio, antes de las parcelas experimentales se cultivaban hortalizas, en general cucurbitáceas y maíz. La caracterización de suelo se hizo en el horizonte A comprendido desde 0 a 25cm, luego de un pase de arado y rastra liviana a 25 cm de profundidad (capa arable) para la preparación del terreno. Los análisis texturales fueron realizados en el laboratorio de suelos de la UNAN-LEÓN, utilizando el método de densidad y la técnica de Bouyoucos con el triángulo textural USDA.

Procedimiento experimental. Se establecieron parcelas experimentales de 400m² en cada finca, dividida en 8 parcelas de 16m² cada una para la aplicación de los diferentes tratamientos: Testigo/control (T), Biocarbón (B), Gallinaza (G), Biocarbón + Gallinaza (BG), Biocarbón + Fertilizantes sintéticos (BF), Gallinaza + Fertilizantes sintéticos (GF), Biocarbón + Gallinaza + Fertilizantes sintéticos (BGF). El establecimiento de las parcelas se hizo en la temporada seca, en el mes de febrero.

Biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos.

El biocarbón se obtuvo usando un horno de tipo “55-gallon drum TLUD”, Tambor TLUD de 55 galones, aproximadamente 200L, con el principio de pirolisis lenta y gasificación de “Top-lit UpDraft” desarrollado por el Dr. Thomas B. Reed’s en el año 2003 (Anderson *et al.* 2007) el cual tuvo un rendimiento del 15% aproximadamente en esos tipos de madera utilizados, alcanzando temperaturas de hasta 450 ° C durante 2 horas en la carbonización de la biomasa en la parte inferior de dentro del reactor y hasta 550 ° C en la parte superior de gasificación. Se produjo

un total de 864 kg de biocarbón, partiendo de la mezcla de 5760 kg de madera de tres fuentes: Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh), Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) y Tigüilote (*Cordia dentata* Poir). Se usaron 2000 kg de madera seca de tigüilote, 1820 kg de eucalipto y 1940 kg de neem, se eligieron estas especies por su utilidad y abundancia en la zona, siendo las fuentes de madera más usados por la población rural para sus estufas. El contenido de materia orgánica del biocarbón de neem según su peso fue mayor que el resto (89%) y el pH de las tres fuentes de biocarbón fue de 10. Nutricionalmente el biocarbón de tigüilote aporta en contenido más micronutrientes, P: 11.5 mg/100g, Cu: 13.8 mg/100g, Fe: 11.5 mg/100g y Zn: 16.7mg/100g que las otras maderas. El biocarbón fue aplicado e incorporado en el suelo en una sola aplicación antes de la siembra con una dosis de 15 t ha⁻¹, equivalente a 24kg en aquellas parcelas que llevan este tratamiento, luego de analizar la capacidad de

abastecimiento de madera para la producción de biocarbón en la zona y las recomendaciones de los autores de recientes investigaciones de biocarbón en gramíneas. El 73% del biocarbon aplicado al suelo tenía tamaños de partícula entre 9 y 2 mm de diámetro y el 27% con tamaños menores de 2mm. La gallinaza fue comprada a un granjero local de gallinas ponedoras en el municipio de León, la producción de huevos funciona en un sistema de ponedoras de piso. La gallinaza fue recolectada del piso, conteniendo material de cama (aserrín), alimentos balanceados altos en calcio y estiércol de gallina. Según el análisis nutricional de la gallinaza, esta contiene: P: 3 mg/100g, Ca: 10 mg/100g, K: 4 mg/100g, Cu: 33 mg/100g, Fe: 11 mg/100g, Mn: 5 mg/100g, Zn: 24 mg/100g. (Cuadro 2) Se aplicó a una dosis de 15 t ha⁻¹, equivalente a 24kg en las parcelas que llevan ese tratamiento, esta fue incorporada al suelo en tres momentos: 8 kg antes de la siembra, 8 kg a los 15 después de la siembra y 8 kg a los 45 días de cultivo.

Cuadro 2. Valores de los parámetros físico-químicos del biocarbón proveniente de tres fuentes de madera, su combinación y la gallinaza

Técnica	Parámetros físico - químicos	Materiales				Gallinaza
		Biocarbón Combinado	Biocarbón Eucalipto	Biocarbón Neem	Biocarbón Tiguilote	
Potenciometría	pH	10.3	10.3	10.3	10.2	8.7
Conductimetría	CE (mS/cm)	2.3	1.7	1.8	2.8	6.5
Calcinación	MO %	86.7	85.8	89.3	78	64.4
Espectrofotometría AA	P2O5 mg/100g	3.2	2.1	1.7	4.3	2.8
Espectrofotometría AA	K2O mg/100g	2.3	2.1	2.2	3	4
Espectrofotometría AA	CaO mg/100g	6.7	8.5	6.8	7.8	10.1
Espectrofotometría AA	MgO mg/100g	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Volumetría	CIC meq/100g	7.6	1.1	1.5	1.1	15.3
Espectrofotometría AA	Cu mg/100g	9.4	7	9.1	13.8	33.3
Espectrofotometría AA	Fe mg/100g	10.5	8.4	10.8	11.5	11
Espectrofotometría AA	Mn mg/100g	5	3.6	5.7	5.7	5.2
Espectrofotometría AA	Zn mg/100g	17	12.7	15.4	16.7	23.9

Según McLaughlin (2010), la sostenibilidad del biocarbón en el suelo está dada por su larga duración y resistencia a la descomposición en los suelos, ya que las bacterias, hongos y microorganismos pueden habitar entre las estructuras del biocarbón, pero no alimentarse de ellas. Se utilizó como fertilizantes sintéticos, un completo 12-30-10 (NPK) aplicado a chorro corrido en los surcos justo antes de la siembra, a una dosis de 284 kg ha⁻¹, es decir 0.45 kg por 16 m², luego a los 15 días se aplicó urea (46-0-0) a una dosis de 284 kg ha⁻¹, es decir 0.45 kg por 16 m², a los 45 días se aplicó sulfato de amonio (21% nitrógeno y 24% azufre) por punto a una dosis de 284 kg ha⁻¹, es decir 0.45 kg por 16 m².

Cultivo. El maíz era de la variedad NB-6, fue sembrada al espeque con 3 semillas por punto distanciados a 0.25 entre sí. Se realizó un raleo a los 10 días después de la siembra para un total de 108 plantas por 16 m², con una densidad de 67,500 plantas por hectárea; cada parcela con los tratamientos estaba constituida por 6 surcos distanciados entre sí a 0.7 m. El mismo cultivo se realizó en dos temporadas del año, en temporada seca y temporada lluviosa.

Capacidad de retención de agua. Para conocer cuál es el efecto de los tratamientos en la capacidad de retención de agua en el suelo, según la textura, se realizaron mediciones del porcentaje de humedad volumétrica (%HV) a los 15 días después de la siembra durante la temporada seca con el propósito de uniformizar la cantidad de agua aplicada a todas las parcelas, tomando mediciones en 10 puntos de cada parcela de 16 m² usando un TDR de humedad

instantánea de suelo “MP406” (Tapias *et al.* 2001). El procedimiento consiste en introducir el medidor al suelo a una profundidad de 10 cm para medir el porcentaje de humedad volumétrica. Esta operación se realizó antes de la siembra para asegurarnos de que no había humedad en el suelo (0%) antes de ser regada y a los 15 días después de la siembra con un régimen de riego estable, que equivale a 48 L por cada tratamiento de 16 m² tanto por la mañana (6:00 am), como en la tarde (4:30 pm) para hacer un total de 96 L de agua al día. La medición del %HV se realizó a las 7:00 am, antes del riego de la mañana, para evitar que las parcelas fuesen expuestas a la radiación solar y prevenir la evaporación del agua del suelo. Se partió del principio que consiste en dejar infiltrar el agua gravitacional que estaba contenida en los macroporos (10-50 micras) de las partículas de suelo desde el último riego del día anterior, realizado a las 4:30 pm y medir únicamente el agua que quedó retenida de manera higroscópica (<10 micras) y no higroscópica (capilar) en los meso y microporos del suelo (Prieto 2004).

Infiltración de agua. Para conocer el efecto de los tratamientos y las texturas en cuanto a la velocidad de infiltración de agua, Se recolectarán 4 muestras por cada tratamiento, para un total de 288 muestras usando los cilindros metálicos a los 50 días después de la siembra usando el método de “Flujo de agua” (Reyes 2010), que consiste en colocar las muestras con los cilindros previamente secados al horno a 105 °C por 24 horas y luego saturarlos completamente en agua, para luego medir el coeficiente de infiltración (*K*), tomando en cuenta la siguiente fórmula:

$K = \frac{QL}{At\Delta H}$, donde: K es la constante de infiltración (cm/s), Q es la cantidad de flujo de agua (20 ml), L es el espesor del cilindro (5.1 cm), A es el área de la superficie de la muestra (19.6 cm²) y ΔH es la diferencia de las cabezas de agua (6.8 cm).

Densidad aparente. Para la medición de la densidad aparente, se recolectaron 4 muestras en cada tratamiento, para un total de 288, utilizando los cilindros de densidad aparente (Forsythe 1985), estos fueron llevados a secado en un horno a una temperatura de 105 ° C por 24 horas para obtener el valor de la masa seca (M_s), dividido entre el volumen total de la muestra en el cilindro (V_{total}):

$$Dap = \frac{M_s}{V_{total}}$$

Análisis de suelos. Se recolectó una muestra compuesta por 5 submuestras de cada tratamiento, para un total de 72 muestras del experimento a una profundidad entre 20-25 cm a los 45 días de cultivo en temporada seca y se realizaron análisis de parámetros químicos de pH utilizando la técnica de potenciometría, capacidad de intercambio catiónico usando la técnica de volumetría, materia orgánica con la metodología de Walkley Black, nitratos (NO³) usando la técnica de cataldo modificado, fósforo utilizando Bray II, potasio, calcio, magnesio y sodio usando la metodología de acetato amónico 1N pH 7. Esta metodología fue implementada por el laboratorio de suelos de la UNAN-LEÓN.

Producción de maíz. En la temporada lluviosa, se volvió a realizar la siembra de maíz aplicando los mismos tratamientos que en la temporada seca a excepción del

biocarbón que ya estaba incorporado en el suelo. Las precipitaciones durante el período de cultivo no fueron constantes en todas las áreas, sin embargo las diferencias en cantidades de agua entre los municipios fue uniformizada complementando con agua utilizando riego por goteo y regaderas de mano hasta llegar a un total de 503 mm en cada municipio equivalente a 8045 L en cada tratamiento de 16 m² durante un período de 85 días. A los 60 días después de la siembra en temporada lluviosa se cosecharon los chilotos (elotes en formación pequeños), seleccionando aquellos que estaban en la parte inferior/baja de la planta, para dejar crecer el chilote superior que formaría más tarde la mazorca de cosecha. A los 85 días se cosecharon todos los elotes de cada tratamiento y se obtuvo el peso (kg) en una balanza, para obtener los pesos de producción promedio de cada tratamiento. Se escogieron 10 plantas al azar de cada tratamiento, para hacer un total de 720 plantas del experimento y fueron pesadas y llevadas al laboratorio para secarlas al horno a 60-70 ° C durante 48 horas, luego se volvieron a pesar para obtener el peso seco de la planta completa con sus raíces; también se obtuvo el peso seco de las raíces (kg) y se midió la profundidad (cm) de las raíces de las plantas de maíz. Se procedió a realizar un cálculo del rendimiento de la producción de maíz en elotes en toneladas por hectárea (t ha⁻¹) (Major *et al.* 2010).

Análisis estadístico. El efecto de los tratamientos fue determinado con los análisis de varianzas (ANOVA) de los Modelos Lineales y Mixtos de Infostat© utilizando parcelas divididas en un Diseño Completamente al Azar. La separación de medias se realizó usando “least significant

difference test (LSD)” (Little and Hills, 1978) y DGC (Di Rienzo *et al.* 2002).

Resultados y discusión

Propiedades físicas de suelo y desarrollo radicular

Densidad aparente. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el estudio de la densidad aparente del suelo en la interacción entre las clases de textura y los diferentes tratamientos ($p=0.0028$). Los mejores tratamientos fueron los que tuvieron como resultado densidades aparentes bajas (letra b) y fueron aquellos que

contenían biocarbón y mezclas con otros abonos: B, BxG y BxGxF $\bar{x} = 0.84 \text{ g/cm}^3$, 0.82 g/cm^3 y 0.83 g/cm^3 respectivamente, (DGC, $\alpha=0.05$). El caso contrario ocurrió con las densidades aparentes de los suelos de textura Arenoso Franco y Franco Arenoso, que no fueron diferentes significativamente y tuvieron densidades aparentes de suelo altas (Fig. 1). Resultados similares reportan Chen *et al.* (2010), quienes encontraron que en suelos aplicados con biocarbón de la bagasa de caña la densidad aparente llegaba a medir 0.70 g/cm^3 comparado con 1.07 g/cm^3 del control donde no se aplicó algún tipo de biocarbón. Efectos similares fueron observados por Laird *et al.* (2010) en el suelo al aplicar diferentes proporciones de biocarbón.

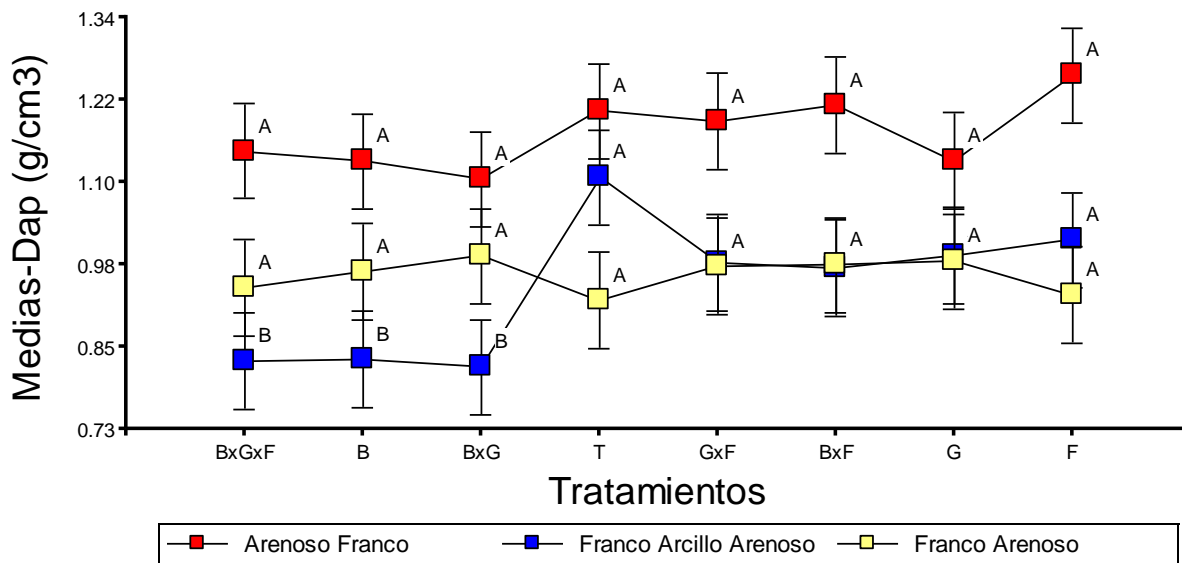


Figura 1. Densidad aparente (Dap) (g/cm^3) del suelo en cada tratamiento en tres texturas diferentes a los 50 días después de la siembra en temporada seca. Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxF= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxF= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Infiltración de agua. La velocidad de infiltración de agua no tuvo efecto significativo entre los distintos tratamientos, pero si hubo diferencias significativas entre

las diferentes texturas de suelo ($p=0.0050$), siendo la textura Franco Arcillo Arenoso la que tuvo mayor media con $\bar{x}=0.0144$ cm/s. Este suelo a su vez se caracterizaba por tener una estructura de bloques sub-angulares gruesos, lo que influencia directamente la velocidad de infiltración de agua. Los resultados de la velocidad de infiltración son consistentes con los resultados encontrados por Busscher *et al.* (2010), quienes no encontraron diferencias significativas en la infiltración al agregar biocarbón al suelo en comparación con suelos sin enmiendas, en la discusión explican que la infiltración está directamente relacionada con la dureza del suelo (Wheaton *et al.* 2008; Osuna *et al.* 2006). El agua que se pierde en el suelo por infiltración es aquella que estaba contenida en los macro-poros y espacios inter-estructurales debido a la gravedad y la poca tensión que pueden generar los agregados (Liu *et al.* 2003); en este caso la presencia de bloques sub-angulares y la baja densidad aparente del suelo con textura Franco Arcillo Arenosa produjeron un efecto similar. Esto es una gran ventaja para el promover desarrollo radicular de las plantas y para evitar encharcamientos en el suelo durante la época lluviosa (Osuna *et al.* 2006; Liu *et al.* 2003).

Humedad volumétrica. Por otro lado, el porcentaje de humedad volumétrica (%HV) no tuvo efecto significativo entre los distintos tipos de textura, pero si hubo diferencias significativas entre los efectos de los

tratamientos ($p<0.0001$). Se realizó un LSD de Fisher ($\alpha=0.05$), encontrando diferencias significativas en entre las medias de los tratamientos, siendo mejores aquellos que contienen biocarbón comparado con los que no tienen biocarbón, sin embargo se observa una tendencia a mejorar la capacidad de retención de humedad en los tratamientos que contenían biocarbon y gallinaza (BxG) con la mayor de las medias $\bar{x} = 18\%$ aunque no es estadísticamente diferente de los tratamientos con biocarbón (Fig. 2). Este resultado de la aplicación de biocarbón con gallinaza a una dosis de 15 t ha^{-1} tanto biocarbón como de gallinaza fue relativamente igual que el encontrado por Karhu *et al.* (2011) que era de 11% de capacidad de retención de agua pero con una dosis de 9 t ha^{-1} de biocarbón. De forma similar son los datos obtenidos por Laird *et al.* (2010) comparando la retención de agua con tres dosis diferentes de biocarbon y de gallinaza, obteniendo mayores resultados en dosis de 20 t ha^{-1} de biocarbón, tampoco tuvieron diferencias estadísticamente significativas al usar o no gallinaza para la variable de retención de humedad. En general a mayor dosis de biocarbón se logrará tener una mayor capacidad de absorción de agua (Glaser *et al.* 2002). Estos resultados se explican debido a que el biocarbón ayuda a bajar la densidad aparente de los suelos, lo cual permite que haya más espacios de aire y espacios porosos que permitan una mayor retención de agua (Chen *et al.* 2010; Osuna *et al.* 2006).

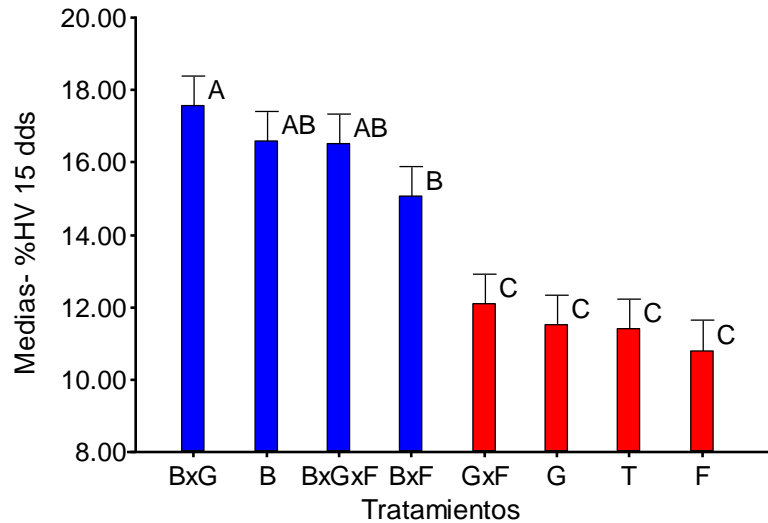


Figura 2. Porcentajes de retención de humedad volumétrica (%HV) de cada tratamiento a los 15 días después de la siembra. Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxF= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxF= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Desarrollo radicular. En el desarrollo radicular de las plantas de maíz se ha encontrado que tanto en la profundidad como en la biomasa total de las raíces han tenido interacción significativa entre los efectos de los diferentes tipos de textura de suelo y los tratamientos ($p=0.0117$ y $p=0.0306$), respectivamente. En el caso de la profundidad de raíces el efecto de las interacciones está dado por los tratamientos de Biocarbón con Gallinaza (BxG) y Gallinaza (G), en texturas Franco Arcillo Arenoso, los cuales muestran las mejores medias: $\bar{x}=27$ cm y 28 cm, respectivamente. En la variable de biomasa total de raíces las medias más altas están dadas por las texturas de suelo: Arenoso Franco y Franco Arenoso, sin embargo la aplicación de gallinaza en un suelo Franco Arcillo Arenoso registró una media de: $\bar{x}=0.023$ kg, la cual a su vez no es

significativamente diferente de las mayores medias de las mejores texturas registradas para el desarrollo radicular, lo que indica que enmiendas de biocarbón con gallinaza pueden hacer mejoras en la textura menos favorable para el desarrollo radicular, (Fig. 3). En el suelo se pudo observar que las raíces eran más fibrosas y tenían mayor longitud para estos tratamientos, lo más sorprendente es encontrar que las raíces están directamente allegadas a las pequeñas estructuras de biocarbón que fueron puestos en el suelo. Efectos similares encuentran Lehman *et al.* (2003), quienes compararon suelos antrosoles en la Amazonía y suelos ferralsoles con enmiendas de biocarbón encontrando que en los suelos con aplicaciones de biocarbón las raíces estaban incrustadas alrededor de las piezas de biocarbón e incluso se encontraban atravesando las estructuras, lo cual indica que los nutrientes en el biocarbón estaban muy

disponibles y que las raíces podían tener acceso a ellas, también agregan que los nutrientes pudieron haberse movido de las piezas de biocarbón hacia la rizósfera. Las enmiendas orgánicas y la presencia de biocarbón en el suelo incrementa el banco de

nutrientes en la zona radicular (Steiner *et al.* 2007). Sin embargo, la estructura del suelo es el factor que más influye en el crecimiento de las raíces, ya que afecta el abastecimiento de oxígeno, agua y nutrientes a la solución del suelo (Vaz *et al.*, 2001).

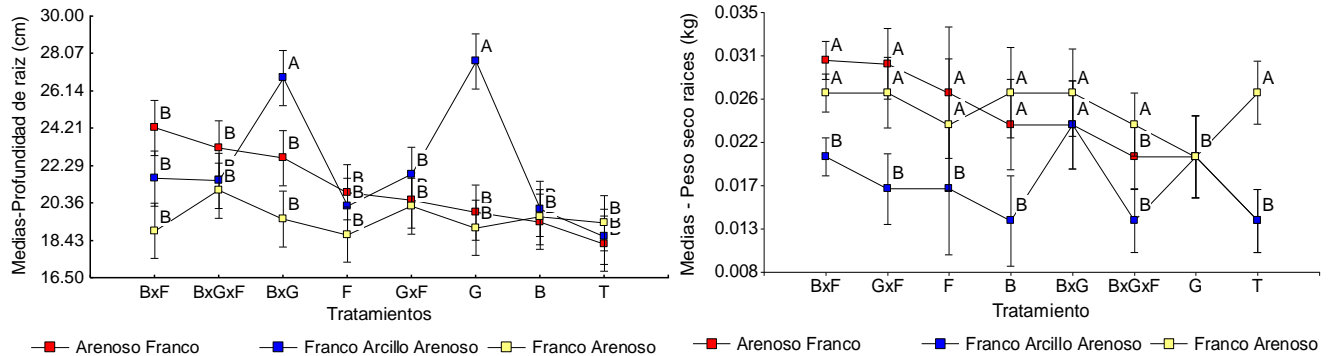


Figura 3. Efecto de las texturas y de los tratamientos en la profundidad de raíces y peso seco (biomasa) de las mismas a los 85 días después de la siembra. Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxG= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxG= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos DGC, medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Propiedades químicas de suelo. No se encontró diferencias significativas del efecto de los tratamientos en los valores de la Materia Orgánica (MO) y de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) con 15 t ha^{-1} que solo tenían diferencias significativas debido al efecto de las texturas ($p=0.0001$ y $p=0.0001$), respectivamente; los mayores porcentajes de MO y CIC se obtuvieron de las texturas Franco Arcillo Arenoso, debido al alto contenido de arcillas, según también lo explican Xu *et al.* (2012). Pero si se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para el estudio del pH del suelo ($p=0.0004$). Se encontraron diferencias significativas entre las

medias de letras diferentes, siendo mejores los tratamientos que contienen un nivel alto de pH, en este caso, fueron todos aquellos tratamientos que contenían biocarbón o la mezcla con el mismo: B, BxG, BxF y BxGxG: $\bar{x} = 7.4, 7.4, 7.4$ y 7.5 respectivamente, para cualquier tipo de textura (LSD Fisher, $\alpha=0.05$). Por otro lado los tratamientos con aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y la parcela Testigo no fueron diferentes significativamente reportando los valores más bajos de pH encontrados en los análisis de suelo: 6.6, 6.9 respectivamente.

La aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo acelera la actividad microbiana, la cual

se alimenta directamente de los compuestos de carbono en el suelo, disminuyendo la CIC y directamente la capacidad buffer del suelo para mantener un equilibrio de los hidrogeniones $[H^+]$ en la solución del suelo (Guo *et al.* 2010). El biocarbón no solo frena la disminución del pH en un suelo, sino que a su vez incrementa los valores del mismo, debido a la alta CIC que posee el mismo antes de ser aplicado al suelo, lo cual ayuda a absorber y adherir altas concentraciones de hidrogeniones $[H^+]$ que pudiesen acidificar el suelo (Atkinson *et al.* 2010; Xu *et al.* 2012). Lehman *et al.* (2003) también reportan que los valores de pH son mayores en los antropoles donde se aplicó biocarbón por muchos años comparado con ferralsoles, además agrega en su investigación que el encalado al suelo incremento el pH de la misma manera que lo hizo las enmiendas de biocarbón, no hubo diferencias entre las medias en ambos tratamientos.

Con respecto al contenido nutricional del suelo aplicado con los diferentes tratamientos se encontraron diferencias significativas en cuanto al contenido de P_2O_5 ($p=0.0128$) siendo los mejores aquellos que contenían biocarbón y gallinaza: BxG, BxGxF, GxF y G: $\bar{x} = 66$ mg/100g, 62 mg/100g, 82 mg/100g y

49 mg/100g respectivamente, todos siendo significativamente iguales. El biocarbón a su vez, incrementa la disponibilidad de fósforo en el suelo debido a la alta capacidad de retención que este tiene debido a la alta porosidad y la biodisponibilidad del mismo en el suelo por la acción de los microorganismos (Atkinson *et al.* 2010; Edelstein y Tonjes 2012; Wang *et al.* 2012); también hubo diferencias significativas de los tratamientos en cuanto al contenido de K_2O ($p<0.0001$) y CaO ($p<0.0001$). Para el caso del K_2O , los tratamientos que tuvieron mayor media fueron: BxG, GxF y BxGxF, $\bar{x} = 111$ mg/100g, 115 mg/100g, 139 mg/100g respectivamente; y para CaO , las mayores medias fueron dadas por todos los tratamientos que recibieron biocarbón o alguna combinación con el mismo: B, BxG, BxF, BxGxF, $\bar{x} = 368$ mg/100g, 324 mg/100g, 321.5 mg/100g y 333 mg/100g respectivamente. Las aplicaciones de biocarbón incrementan el contenido de nutrientes en el suelo, incluyendo las bases intercambiables de potasio (K_2O) y calcio (CaO) con lo cual podríamos decir que el biocarbón tiene el potencial para enriquecer los suelos, independientemente de su textura y edad (Laird *et al.* 2010; Belyaeva y Haynes 2011; Rajkovich *et al.* 2011), (Cuadro 3).

Cuadro 3. Diferencias de los efectos de los diferentes tratamientos aplicados al suelo sobre sus propiedades fisicoquímicas. Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxF= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxF= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Parámetros	Tratamientos								Valor-p
	T	B	G	F	BxG	BxF	GxF	BxGxF	
pH	6.85 ^{bc}	7.37 ^a	6.86 ^{bc}	6.63 ^c	7.36 ^a	7.36 ^a	7.1 ^{ab}	7.46 ^a	0.0004
MO %	3.62	3.18	3.23	3.08	3.37	3.32	3.66	3.66	0.4503
CICmeq/100g	6.31	7.49	6.84	7.99	6.76	7.00	6.86	7.63	0.9599
P2O5mg/100g	23.9 ^b	24.36 ^b	49.06 ^a	27.23 ^b	65.76 ^a	32.16 ^b	81.71 ^a	61.57 ^a	0.0128
K2O mg/100g	44.92 ^c	71.19 ^b	76.08 ^b	41.51 ^c	110.45 ^a	66.94 ^b	114.96 ^a	139.25 ^a	<0.0001
CaO mg/100g	246.17 ^c	367.61 ^a	279.51 ^b	246.17 ^c	324.40 ^a	321.52 ^a	285.78 ^b	333.14 ^a	<0.0001

En el caso del contenido de magnesio y nitratos se encontró que existe una interacción significativa entre los diferentes tratamientos y las clases de texturas ($p=0.0070$) y ($p=0.0401$), respectivamente. En ambos casos existe un mayor contenido de nutrientes en los suelos de tipo Franco Arenoso y un menor contenido de nutrientes en los suelos Arenoso Franco y Franco Arcillo Arenoso. Al analizar las interacciones se observa que hay una tendencia a incrementar el contenido de Magnesio en los suelos Franco Arcillo Arenoso, cuando se realizan aplicaciones de biocarbón únicamente (B), llegando hasta $\bar{x} = 35$ mg/100g. De igual manera que el resto de las bases intercambiables las aplicaciones de biocarbón tienden a aumentar la disponibilidad de los nutrientes catiónicos, en este caso el magnesio (Laird *et al.* 2010; Belyaeva y Haynes 2011; Rajkovich *et al.* 2011), evidentemente el biocarbón por si solo aporta de este elemento en un suelo Franco Arcillo Arenoso de igual manera como lo haría un suelo Franco Arenoso, el mejor de los casos. Por otro lado cuando se aplicó gallinaza

combinado con fertilizante (GxF) incrementó significativamente el contenido de nitrógeno (N) de nitratos (NO_3) en el suelo Franco Arcillo Arenoso $\bar{x} = 35$ mg/100g; sin embargo el resultado de la interacción para el caso del Nitrógeno de nitratos no fue estadísticamente diferente de los resultados con los diferentes tratamientos: BxGxF, F, BxF, G y BxG en la textura de suelos Franco Arenoso a excepción del biocarbón solo (B) y el Testigo (T) que obtuvieron los valores más bajos significativamente.

El biocarbón tiene la capacidad de retener el nitrógeno amoniacal y hacerlo disponible para la planta una vez incorporado en el suelo a como lo explica Taghizadeh-Toosi *et al.* (2011), sin embargo la duración del nitrógeno amoniacal en el suelo es muy corta (Spokas *et al.* 2011). El nitrógeno proveniente de los minerales del suelo, en este caso el nitrato (NO_3) es el que se encuentra juntamente con el amoniaco disponible para las plantas en la solución del suelo (Ortega *et al.* 2005), siempre y cuando esté al alcance de las raíces.

El biocarbón también ayudará a retener las partículas de nitratos que existan en el suelo y ubicarlas en un lugar estratégico para el aprovechamiento por las raíces, pero se necesita siempre combinar el biocarbón con abonos que sean abundantes en nitrógeno para poder enriquecer los suelos y que el nutriente esté disponible para las plantas (Rajkovich *et al.* 2011; Zavalloni *et al.* 2011), es por esto

que las tendencias observadas en la gráfica apuntan a que los tratamientos que contienen mayor cantidad de nitrógeno son aquellos que aportarán más de este nutriente al suelo. El nitrato al no ser aprovechado o retenido en el suelo en un corto y mediano plazo tiende a lixiviarse, pero al usar el biocarbón se podría evitar este tipo de riesgo (Lehman *et al.* 2003). (Fig. 4).

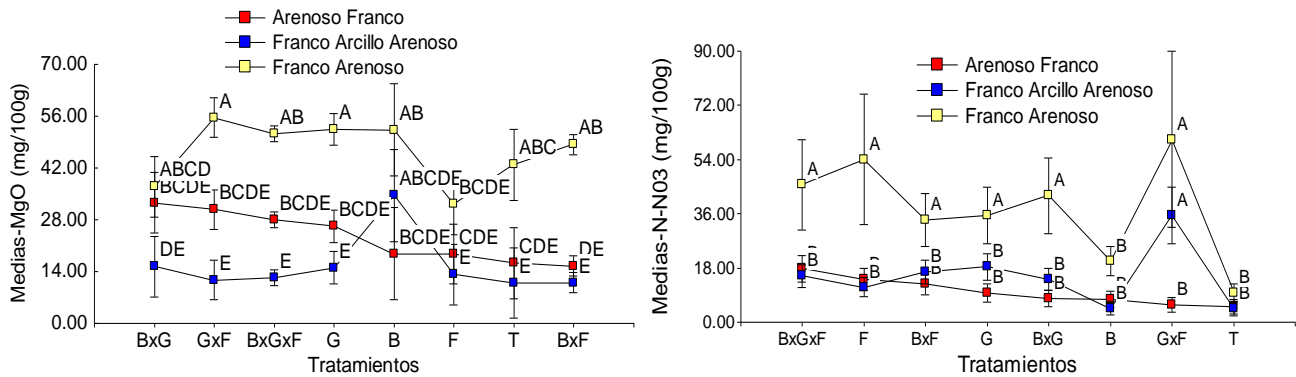


Figura 4. Efecto de las texturas y de los tratamientos en la disponibilidad de Magnesio (MgO) y Nitrógeno (NO³) a los 50 días después de siembra. LSD (gráfica 1) y DGC (gráfica 2). Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxG= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxG= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p<= 0.05).

Producción y rendimientos de maíz. Se encontró diferencias significativas en el efecto de los diferentes tratamientos en la producción de chilotes (p=0.0025), mazorcas (p<0.0001), rendimientos por hectárea (p<0.0001) y en el peso seco de las plantas de maíz (p=0.0001). El mejor de los tratamientos con una media con tendencia más alta es el Biocarbón con Gallinaza (BxG) con 0.05 kg/Chilote, no siendo significativamente diferente a los demás tratamientos, con excepción del testigo

(T) y el biocarbón (B) los cuales tienen letras diferentes. En el caso de la producción de maíz en mazorcas, el tratamiento con media más alta es el de gallinaza con fertilizante (GxG) con una media de peso de mazorca de 0.17 kg, a pesar de ser la media más alta, no difiere estadísticamente de los tratamientos BxG, F, G, los cuales a su vez tienen letras iguales. Los mejores tratamientos con medias más altas al medir el rendimiento en Elotes en t ha⁻¹ fueron: el Biocarbón con Gallinaza

(BxG) y la Gallinaza (G) con medias de 7.5 kg/mazorca en ambos tratamientos; sin embargo no fueron estadísticamente diferentes de los tratamientos: F y GxF. En cuanto al peso seco de las plantas completas de maíz se obtuvo los mejores resultados tanto del tratamiento Biocarbón con Gallinaza (BxG) como de la Gallinaza con Fertilizantes (GxF), con medias de 0.12 kg y 0.12 kg respectivamente, aun así no son estadísticamente diferentes de los tratamientos: F y G. (Cuadro 4). Major *et al.* (2010) Evaluaron el efecto de 3 dosis de biocarbón a lo largo de 4 años en un cultivo de maíz, observando efectos significativamente aditivos cada siguiente año en términos de: rendimientos y biomasa de las plantas; sin embargo con la aplicación de dosis de 20 t ha⁻¹ durante el primer año de cultivo se obtuvieron mayores rendimientos en comparación con el testigo. Otros autores han obtenido resultados positivos en los rendimientos de maíz durante el primer ciclo al colocar dosis altas de biocarbón (44 t ha⁻¹) incorporadas al suelo (Zhang *et al.* 2011). Por otro lado Rajkovich *et al.* (2011) reportan que al aplicar dosis bajas de biocarbón 2.6 t ha⁻¹ encontraron que había un incremento en el aprovechamiento del nitrógeno por la planta incluso mejor que el maíz aplicado completamente con fertilizantes, pero que al aplicar dosis de biocarbón superiores a 26 t ha⁻¹ disminuyó los

rendimientos y el contenido de nitrógeno absorbido por la planta. Tal parece ser que la producción de maíz es altamente sensible a la disponibilidad de Nitrógeno en el suelo, aportado principalmente por los diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados, ya sean orgánicos o inorgánicos; (Unger y Killom 2011), sin embargo los resultados de este experimento nos demuestra que al aplicar biocarbón con gallinaza se obtienen efectos iguales estadísticamente, pero con tendencias a mejorar la productividad del maíz, comparado con la aplicación de fertilizantes sintéticos o gallinaza solamente. El biocarbón incrementa el aprovechamiento del nitrógeno por las plantas e incrementa los rendimientos en el cultivo de maíz a lo largo del tiempo, mientras tanto aplicar desechos orgánicos de animales si ayuda a incrementar los rendimientos en un ciclo de cultivo, pero no mejora los rendimientos de maíz en los siguientes ciclos (Sukartomo *et al.* 2011). Con el paso del tiempo los suelos se van degradando y los rendimientos van decayendo, desde ese momento la productividad depende de las cantidades de fertilizantes químicos que se apliquen al suelo, y aun así las aplicaciones de nitrógeno no tendrán un efecto aditivo en la productividad debido a la falta de abonos orgánicos en el suelo (Kimetu *et al.* 2008).

Cuadro 4. Efecto de los tratamientos en la producción de maíz (*Zea mays*). Los tratamientos con letra B= biocarbón, G= gallinaza, F= fertilizantes sintéticos, BxG= biocarbón y gallinaza, BxF= biocarbón y fertilizantes sintéticos, GxF= gallinaza y fertilizantes sintéticos, BxGxF= biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Variables	Unidad de medida	Tratamientos								Valor-p
		T	B	G	F	BxG	BxF	GxF	BxGxF	
Chilotes	kg/chilote	0.02 ^c	0.036 ^b	0.047 ^{ab}	0.048 ^{ab}	0.05 ^a	0.041 ^{ab}	0.045 ^{ab}	0.046 ^{ab}	0.0025
Mazorcas	kg/mazorca	0.11 ^d	0.131 ^c	0.165 ^{ab}	0.153 ^{ab}	0.168 ^{ab}	0.149 ^{bc}	0.17 ^a	0.149 ^{bc}	<0.0001
Rendimiento Elotes	t ha ⁻¹	5.03 ^d	5.93 ^{cd}	7.50 ^a	6.98 ^{ab}	7.50 ^a	6.53 ^{bc}	7.35 ^{ab}	6.68 ^{abc}	<0.0001
Peso seco plantas	kg/planta	0.089 ^d	0.100 ^{bcd}	0.109 ^{abc}	0.112 ^{ab}	0.122 ^a	0.093 ^{cd}	0.123 ^a	0.093 ^{cd}	0.0001

Conclusiones

Luego de realizar esta investigación se concluye que el biocarbón con una dosis de 15 t ha⁻¹ en un solo ciclo de cultivo de maíz NB-6 mejora los rendimientos y las propiedades físico-químicas de los suelos con texturas Franco Arenoso, Arenoso Franco y Franco Arcillo Arenoso. Aumenta la capacidad de retención de humedad del suelo y disminuye a su vez la densidad aparente del mismo. Incrementa el nivel del pH del suelo, aumenta el contenido de bases intercambiables: calcio, magnesio y potasio. La aplicación de biocarbón con gallinaza mejora la disponibilidad de fósforo y nitrógeno en el suelo; también mejora el desarrollo radicular de las plantas de maíz, aumenta la producción de la biomasa de las plantas, la producción de chilotes y de mazorcas en peso; y mejora los rendimientos en t ha⁻¹ del cultivo de maíz. El biocarbón mejora las propiedades físico-

químicas de los suelos de clase Franco Arcillo Arenosos, especialmente por disminuir la densidad aparente de los mismos. Al aplicar biocarbón con gallinaza mejora sus condiciones haciéndolos tan buenos como los suelos Franco Arenoso y Arenoso Franco en aumentar el contenido de magnesio y mejorar el desarrollo radicular, así mismo como los rendimientos en general del cultivo de maíz. La velocidad de infiltración del agua, contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, se vieron influenciadas directamente por las texturas de los suelos y no por el efecto de los tratamientos en un en un solo ciclo de cultivo. En general la aplicación de enmiendas de biocarbón con abonos orgánicos es una valiosa estrategia que permite mejorar la resiliencia de los sistemas productivos agropecuarios ante el cambio climático en términos de adaptación y mitigación.

Referencias bibliográficas

- Anderson, PS; Reed, TB; Wever, PW. 2007. Micro-Gasification: What it is and why it works. Boiling Point No 53.
- Atkinson, CJ; Fitzgerald, JD; Hipps, NA. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil* 337(1-2):1-18.
- Belyaeva, ON; Haynes, RJ. 2011. Comparison of the effects of conventional organic amendments and biochar on the chemical, physical and microbial properties of coal fly ash as a plant growth medium. *Environmental Earth Sciences* 66(7):1987-1997.
- Bol R, Amelung W, Friedrich C, Ostle N (2000) Tracing dung-derived carbon in temperate grassland using ¹³C natural abundance measurements. *Soil Biol Biochem* 32:1337–1343
- Busscher, WJ; Novak, JM; Evans, DE; Watts, DW; Niandou, MAS; Ahmedna, M. 2010. Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand. *Soil Science* 175(1):10-14.
- CATIE-PROLENA, 2001. Diagnóstico de la Comercialización de la Leña en Nicaragua.
- Chen, Y; Shinogi, Y; Taira, M. 2010. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. *Australian Journal of Soil Research*. 48:526-530.
- Córdova, H; Castellanos, S; Barreto, H; Bolaños, J. 2002. Veinticinco años de mejoramiento en los sistemas de maíz en centroamérica: logros y estrategias hacia el año 2000. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA* 13(1): 73-84.
- Di Rienzo, JA; Guzman, AW; Cassanoves, F. 2002. American Statistical Association and the International Biometric Society *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, Volume 7, Number 2, Pages 129–142
- Ding, Y; Liu, Y; Wu, W; Shi, D; Yang, M; Zhong, Z. 2010. Evaluation of Biochar Effects on Nitrogen Retention and Leaching in Multi-Layered Soil Columns. *Water Air Soil Pollut* 213:47–55.
- Edelstein, DM; Tonjes, DJ. 2012. Modeling an Improvement in Phosphorus Utilization in Tropical Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 36(1):18-35.
- Forsythe, W. 1985. Manual de laboratorio. Física de suelos. IICA. San Jose, Costa Rica.
- Glaser, B; Lehmann, J; Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils* 35(4):219-230.
- Guo, JH; Liu, XJ; Zhang, Y; Shen, JL; Han, WX; Zhang, WF; Christie, P; Goulding, KW; Vitousek, PM; Zhang, FS. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327(5968):1008-10. Disponible en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20150447>
- Hills, FJ; Little, TM. 1978. Agricultural experimentation: Design and analysis. Wiley.
- Hojah, J. Benjamin, T. Soto, G. Donnelly, A. Cerda, R. 2012. The impact of biochar on soil quality and cacao (*Theobroma cacao* L.) production in organic agroforestry systems in the Bribri Indigenous Reserve, Talamanca, Costa Rica. CATIE p.
- Hua, L; Wu, W; Liu, Y; McBride, MB; Chen, Y. 2009. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environ Sci Pollut Res Int* 16(1):1-9. Disponible en

- <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18751746>
- Karhu, K; Mattila, T; Bergström, I; Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140(1-2):309-313.
- Kimetu, JM; Lehmann, J; Ngoze, SO; Mugendi, DN; Kinyangi, JM; Riha, S; Verchot, L; Recha, JW; Pell, AN. 2008. Reversibility of Soil Productivity Decline with Organic Matter of Differing Quality Along a Degradation Gradient. *Ecosystems* 11(5):726-739.
- Laird, DA; Fleming, P; Davis, DD; Horton, R; Wang, B; Karlen, DL. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3-4):443-449.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development* 17(2):197-209.
- Lehman, J; da Silva, Jr., JP; Steiner, C; Nehls, T; Zech, W; Glaser, B. 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.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizão, F.J., Petersen, J., Neves, E.G., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1719–1730.
- Liu, C-W; Cheng, S-W; Yu, W-S; Chen, S-K. 2003. Water infiltration rate in cracked paddy soil. *Geoderma* 117(1-2):169-181.
- Major, J; Rondon, M; Molina, D; Riha, SJ; Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333(1-2):117-128.
- Novak, JM; Busscher, WJ; Laird, DL; Ahmedna, M; Watts, DW; Niandou, MAS. 2009. Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science* 174(2):105-112.
- Ortega B, R., & Mardonez O, R. (2005). Variabilidad espacial de la mineralización de nitrógeno en un suelo volcánico de la provincia de Ñuble, VIII Región, Chile. *Agricultura Técnica*, 65(2), 221-231.
- Osuna, E; Figueroa, B; Oleschko, K; Flores, M; Martínez, M; González, F. 2006. Efecto De La Estructura Del Suelo Sobre El Desarrollo Radical Del Maíz Con Dos Sistemas De Labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- Prieto, C. 2004. El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, danos, control y conservación. (2 ed.) Ecoe Ediciones, Bogotá, Colombia. 380 p.
- Rajkovich, S; Enders, A; Hanley, K; Hyland, C; Zimmerman, AR; Lehmann, J. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48(3):271-284.
- Rapidel, B; Rodríguez, J. 1990. Zonificación Agrometeorológica de las Lluvias en Nicaragua. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Nicaragua. Dirección General de Técnicas Agropecuarias. Programa Nacional de Agrometeorología. CATIE, CIRAD ORSTOM. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales Turrialba, Costa Rica.
- Reyes M, OA. 2010. Caracterización del estado actual de los suelos del departamento de León, en base a sus características físicas y sistemas de producción. En el período abril 2009 a junio 2010. UNAN-LEÓN. León. 73 p.

- Spokas, KA; Novak, JM; Venterea, RT. 2011. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Plant and Soil* 350(1-2):35-42.
- Steiner, C; Das, KC; Melear, N; Lakly, D. 2010. Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. *Journal of Environment Quality* 39(4):1236.
- Steiner, C; Teixeira, WG; Lehmann, J; Nehls, T; Macêdo, JLV; Blum, WEH; Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291(1-2):275-290.
- Sukartono; Utomo, WH; Kusuma, Z; Nugroho, WH. 2011. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture* 49 (1-2): 47-52
- Taghizadeh-Toosi, A; Clough, TJ; Sherlock, RR; Condon, LM. 2011. A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant and Soil* 353(1-2):73-84.
- Tapias, JC; Salgot, M; Casas, A. 2001. Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf. *Edafología*, Vol 8 (3), pp. 1-10.
- Unger, R; Killorn, R. 2011. Effect of the Application of Biochar on Selected Soil Chemical Properties, Corn Grain, and Biomass Yields in Iowa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42(20):2441-2451.
- USDA. 2010. Key to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service (11 ed.) USA.
- Vaccari PF, Baronti S, Lugatoa E, Genesio L, Castaldi S, Fornasier F et al (2011) Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *Eur J Agron.* doi:10.1016/j.eja.2011.01.006
- Vaz, C. M. P., L. H. Bassoi, and J. W. Hopmans. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil & Till. Res.* 60: 35-42.
- Wang, T; Camps-Arbestain, M; Hedley, M; Bishop, P. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil* 357(1-2):173-187.
- Wheaton, A. D., B. M. McKenzie, and J. M. Tisdall. 2008. Management to increase the depth of soft soil improves soil conditions and grapevine performance in an irrigated vineyard. *Soil Till. Res.* 98:68Y80.
- Widowati; Utomo, WH; Guritno, B; Soehono, LA. 2012. The Effect of Biochar on the Growth and N Fertilizer Requirement of Maize (*Zea mays* L.) in Green House Experiment. Vol. 4, No. 5.
- Xu, R-k; Zhao, A-z; Yuan, J-h; Jiang, J. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. *Journal of Soils and Sediments* 12(4):494-502.
- Zavalloni, C; Alberti, G; Biasiol, S; Vedove, GD; Fornasier, F; Liu, J; Peressotti, A. 2011. Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study. *Applied Soil Ecology* 50:45-51.
- Zhang, A; Liu, Y; Pan, G; Hussain, Q; Li, L; Zheng, J; Zhang, X. 2011. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil* 351(1-2):263-275.