

RESPUESTA DEL PACHACO (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) Y LA MELINA (*Gmelina arborea* Roxb.) A LA APLICACIÓN DE BIOCARBÓN Y FERTILIZACIÓN EN EL SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA

RESPONSE PACHACO (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) AND MELINA (*Gmelina arborea* Roxb.) TO THE IMPLEMENTATION OF BIOCARBON AND FERTILIZATION IN THE SOUTH OF THE AMAZON ECUATORIANA

Carlos A Valarezo¹, Miguel A Villamagua², Romney M Mora², Héctor Maza², Wolfgang Wilcke³, Carlos Nieto⁴

¹ Investigador Honorario del proyecto Gestión de la Fertilidad del Suelo con Enmiendas de Carbón Vegetal en Plantaciones de Árboles Maderables en el Sur de la Amazonía Ecuatoriana. Universidad Nacional de Loja. Quitumbe 1103, Loja – Ecuador.

² Docente Investigador de la Universidad Nacional de Loja. Ciudadela Universitaria Guillermo Falconí, sector La Argelia, Loja, Ecuador.

³ Investigador. Institute of Geography and Geoecology, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

⁴ Investigador. Fundación desde El Surco, Quito Ecuador.

Autor para correspondencia: Miguel Villamagua, e-mail: miguel.villamagua@unl.edu.ec; Telefax: 593(0)7 2547322 extensión 110.

Carrera de Ingeniería Forestal,
Universidad Nacional de Loja, Ecuador



Web: www.bosqueslatitudcero.com
Email: bosqueslatitudcero@unl.edu.ec

Recepción: 02 de marzo del 2016

Aceptación: 27 de julio del 2016

Valarezo, C, *et al* 2016. Respuesta del pachaco (*schizolobium parahybum* vell. Conc) y la melina (*gmelina arborea* roxb.) a la aplicación de biocarbón y fertilización en el sur de la amazonia ecuatoriana. Universidad Nacional de Loja

RESUMEN

Se instalaron dos experimentos en suelos del ambiente de ladera degradados por la ganadería bovina en el sur de la Amazonia Ecuatoriana (La Victoria – Zamora, *Typic Kandihumults*, formado de granodiorita; y, Los Zapotes – Panguintza, *Typic Kandiudults*, formado de andesita y brechas tobáceas). Cada experimento tiene 12 tratamientos que se derivan de la combinación de dos especies arbóreas de rápido crecimiento, pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.), la aplicación de dos niveles de fertilización y cal (sin y con N 200, P 150, K 200, Mg 118, S 183 y Zn 40 kg/ha + CaCO₃, 5 and 3 t ha⁻¹ in La Victoria and Los Zapotes, respectivamente) y tres niveles de biocarbón (0,0, 3,0 y 6,0 t ha⁻¹), los cuales se arreglaron en un diseño de parcelas sub – sub divididas (2x2x3), con cuatro repeticiones. Cada sub – sub parcela contiene 16 árboles plantados a 3 x 3 m. En los dos experimentos, en todas las fechas de registro hasta los dos años, se encontraron diferencias altamente significativas por efecto de la fertilización + cal para: altura de planta, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho. El crecimiento y la acumulación de biomasa de melina superó al pachaco en los dos sitios. El mayor crecimiento en altura de las dos especies en Los Zapotes se atribuye a mejores condiciones de fertilidad del suelo que en La Victoria. En los dos experimentos el tiempo de corte para pulpa fue de dos años con la aplicación de cal y nutrientes, en comparación a seis años que se reportan para otras localidades.

Palabras clave: Biocarbón, *Schizolobium parahybum*, *Gmelina arborea* suelos degradados de la Amazonía Ecuatoriana. Terra Preta.

ABSTRACT

Two experiments were laid out on cattle degraded slopping soils in La Victoria - Zamora (*Typic Kandihumults*, granodiorite, slope 15%) and Los Zapotes - Panguintza, (*Typic Kandiudults*, andesite and tuffaceous breccias, slope 60%). Each experiment has twelve treatments derived from the combination of: two rapid growing timber species pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) and melina (*Gmelina arborea* Roxb.), the application of two levels of nutrients and lime (without and with N 200, P 150, K 200, Mg 118, S 183 and Zn 40 kg/ha + CaCO₃, 5 and 3 t ha⁻¹ in La Victoria and Los Zapotes, respectively) and three levels of biochar (0,0, 3,0 y 6,0 t ha⁻¹), which were arranged in a sub- sub-split plots random design (2x2x3), with four replications. Each sub-sub plot contains 16 trees, planted at 3 x 3 m. In both experiments fertilization effects (nutrients + lime) have been highly significant for plant height, basal diameter and diameter at breast height in all recording times during the two years after planting. Growth and biomass accumulation of melina exceeded those of the pachaco in the two study sites. The effects of biochar were no significant in the growth of the two species. The greater height and diameter of the two tree species in Los Zapotes is attributed to better soil fertility than in La Victoria. In both experiments the time for harvesting for pulp of the tree species with the application of nutrients and lime is 2 years, compared to 6 years reported for other localities.

Key words: biochar, *Schizolobium parahybum*, *Gmelina arborea*, degraded soils in Ecuadorian Amazon, Terra Preta.

INTRODUCCIÓN

En el corredor de la red fluvial Zamora-Nangaritza, en la Zona Sur de la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE), los suelos en el rango de altitud de 800 a 1.100 msnm del ambiente de ladera, en condiciones naturales soportan un frondoso bosque tropical biodiverso y multi-estrato, constituido por un conjunto de especies en equilibrio y armonía, cuya reserva de nutrientes se concentra en la biomasa y en la capa orgánica superficial (Valarezo 2004).

La intervención humana sobre este bosque natural, al igual que en el resto de la RAE, ha consistido en la extracción selectiva de las especies arbóreas de valor comercial, luego la tumba, roza y quema, para finalmente establecer pastizales. Así, la conversión del bosque natural a pastizal, interrumpe abruptamente el reciclaje natural de los elementos nutritivos, los cuales se lixivian por efecto de la abundante lluvia, se acelera la mineralización de la reserva de materia orgánica, y se instala un proceso de erosión hídrica, por lo que en un tiempo relativamente corto se degrada la fertilidad del suelo y las tierras se convierten en marginales. Se estima que la afectación alcanza alrededor del 50% de las áreas del pie de monte y las colinas y montañas bajas (aproximadamente 50 000 ha), la misma que lamentablemente sigue creciendo a expensas de la destrucción del bosque primario (Valarezo *et al.*, 1998).

Desde la perspectiva de la utilización productiva y de recuperación de las áreas degradadas, estas tierras (de pendiente entre 12 y 60%) tienen vocación para la repoblación forestal con especies de valor comercial, aprovechando las condiciones de elevada temperatura y humedad de la zona.

Ello permitiría su re-introducción en el sistema comercial y servir como un medio poderoso para diversificar el manejo de la tierra, a la vez que los agricultores se beneficiarían de los efectos de la recuperación (Knoke *et al.*, 2009). Además, las plantaciones forestales pueden constituirse en un mecanismo adecuado para reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera (Onyekwelu *et al.*, 2011). En cambio, la baja fertilidad general de los suelos, la intensa lixiviación de los nutrientes y la fuerte acidez, se constituyen en sus principales limitaciones (Valarezo 2004).

Los fracasos en la reforestación, especialmente en el trópico húmedo a menudo se atribuyen a limitaciones de nutrientes en el suelo (Ultisol) que afectan al crecimiento de los árboles (Siddique 2008). Aunque la fertilización no ha sido una práctica común en el establecimiento y mantenimiento de las plantaciones forestales del trópico, progresivamente se está convirtiendo en un medio importante para mejorar la nutrición de los árboles y consecuentemente acelerar las tasas de crecimiento y reciclaje de nutrientes en los sitios con deficiencias nutritivas (Nwoboshi 2000; Evans y Turnbull 2004). Con la intensificación de la silvicultura que incluye altas densidades y el acortamiento del período de rotación de la plantación, el uso de fertilizantes para potenciar el crecimiento de los árboles cada vez más gana aceptación como práctica cultural (Onyekwelu *et al.*, 2011). Así, en varias partes de Asia la fertilización con P al momento de la plantación es una práctica estándar para *Gemelina arborea* (Evans y Turnbull 2004).

El biocarbón ha sido promovido como una enmienda para recuperar suelos degradados, elevar la productividad agronómica,

incrementar el secuestro del CO₂ atmosférico y entrar en los futuros mercados de comercio de carbono (Spokas *et al.*, 2011). Como biocarbón se denomina al carbón vegetal que se aplica al suelo para mejorar sus propiedades físicas, químicas y de fertilidad (Lehmann, 2007). El biocarbón se puede elaborar a partir de cualquier material orgánico: leña, ramas, hojas, paja, residuos de cultivos, basura orgánica, e inclusive de excretas (Bruges 2010).

Diferentes estudios señalan que las aplicaciones de biocarbón pueden mejorar y mantener las condiciones físicas, químicas y de fertilidad de los suelos del trópico húmedo; así, Lotter (2002) reporta que en la profundidad de la Amazonía Brasileña, en suelos de baja fertilidad, donde el bosque natural ha sido reemplazado con cultivos y pastizales, se encuentran algunas pequeñas áreas dispersas que no presentan el color rojo típico de los Oxisoles, sino que son de color oscuro o negro. Estos suelos se los conoce con el nombre de Terra Preta do Indio (Tierra Negra de Indio) y son característicos de los asentamientos pre-Colombinos de los nativos.

Varias investigaciones han demostrado que en los suelos antropogénicos denominados de Terra Preta, el biocarbón puede mantener altos niveles de materia orgánica y de nutrientes aprovechables para las plantas (Glaser *et al.*, 2002a y Glaser *et al.*, 2002b). En los suelos ácidos, la aplicación de biocarbón incrementa el pH y disminuye la saturación de Al, factores que a menudo constituyen las principales limitaciones de la productividad de los cultivos en los suelos altamente meteorizados de los trópicos húmedos (Cochrane y Sánchez 1980, y Mgagwu y Piccolo 1997); pero, no solamente incrementan el contenido de

nutrientes, sino también la retención de éstos, lo cual es especialmente importante en los suelos mencionados, que tienen baja capacidad de retención iónica (Glaser *et al.*, 2002a). Se reporta, así mismo, que el rendimiento de los cultivos se puede incrementar aún más, cuando la aplicación de enmiendas de carbón van acompañadas de fertilizantes y abonos orgánicos (Glaser *et al.*, 2002a y Lehmann *et al.* 2002). Es en este marco que se formuló el proyecto denominado “GESTIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO CON ENMIENDAS DE CARBÓN VEGETAL EN PLANTACIONES DE ÁRBOLES MADERABLES EN EL SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA”, con un horizonte de mediano plazo (seis años), orientado a generar alternativas para la recuperación de la fertilidad de los suelos ácidos y pobres en las laderas de la Zona Sur de la RAE, como estrategia para la producción de árboles de especies maderables de valor comercial, en la perspectiva de recuperar las áreas degradadas, elevar la captura de CO₂, dinamizar la economía, y atenuar la degradación del bosque primario (Valarezo, 2008).

Uno de los objetivos específicos del proyecto se orienta a determinar el efecto de la aplicación de biocarbón, cal y nutrientes, sobre el crecimiento de las especies arbóreas maderables indicadoras, (*Schizolobium parahybum* y *Gmelina arborea*); para lo cual, en julio-agosto de 2009 se instalaron dos experimentos en suelos degradados por la ganadería del ambiente de ladera del corredor fluvial Zamora – Nangaritza, en el sur de la Amazonia Ecuatoriana, en los sitios la Victoria - cantón Zamora y Los Zapotes – Panguintza, cantón Centinela del Cóndor. En el presente artículo se presentan y discuten

los resultados del crecimiento de las dos especies arbóreas indicadoras hasta los dos años después de la plantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio: La zona de estudio corresponde al territorio del corredor de la red fluvial Zamora-Nangaritza, en la Zona Sur de la RAE, en el rango de 800 a 1 100 m s.n.m, que se extiende entre las ciudades de

Zamora en el Sur y Gualaquiza en el Norte.

El gran paisaje de la zona consiste en un valle estrecho y alargado, con flancos de montañas a ambos lados, pertenecientes a las estribaciones de la Cordillera Real (Oeste) y parte de la Cordillera del Cóndor (Este). El principal sistema de drenaje es el río Zamora con los ríos Yacuambi y Nangaritza como sus afluentes principales.

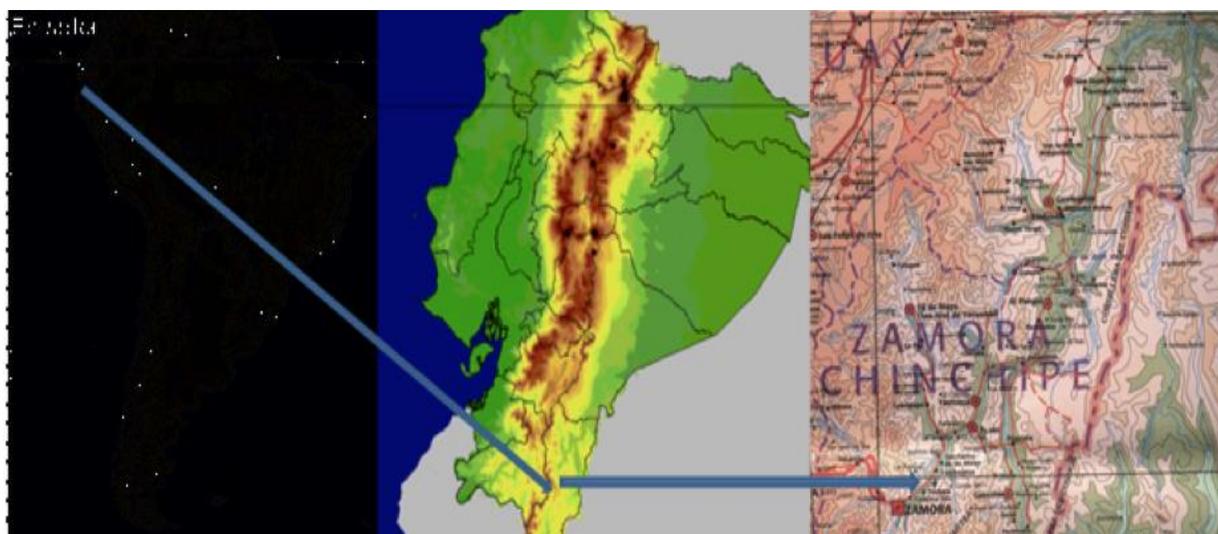


Figura 1. Zona de estudio

El clima del piso bajo de la zona (850 a 1 000 m s.n.m.) presenta las siguientes características: temperatura media mensual 22,0°C; mínima 20,8°C y máxima 22,6°C, precipitación media anual 1 945 mm, con un rango de 1 865 a 2 314 mm; y, humedad relativa media mensual 88% (INAMHI 1993).

Los sitios experimentales

La Victoria (Zamora)

El primer sitio experimental está ubicado en el sector La Victoria, en un terreno perteneciente a la Unidad “BS-62 Zamora”, del Ejército Ecuatoriano, en el cantón Zamora, entre las coordenadas 9 552541 y

9552562 O; y, 0730436 y 0730492 S; y en un rango de altitud de 949 a 964 m s.n.m. El paisaje corresponde a pie de monte, el tipo de relieve es una vertiente y la forma del terreno es una ladera moderadamente escarpada, con 15% de pendiente promedio. Geológicamente se asienta en el gran Batolito de Zamora, de alrededor de 1 800 km², compuesto de leuco granodioritas y granodioritas hornbléndicas (DGGM, 1989).

El suelo (*Typic Kandihumults*), está conformado por una delgada capa orgánica (Horizonte O) de 3 a 4 cm y los horizontes Ap, AE; Bt1; Bt2, CB y C de textura franco arenosa a franco-arcillo arenosa, franco arcillo arenosa. Las raíces se concentran en

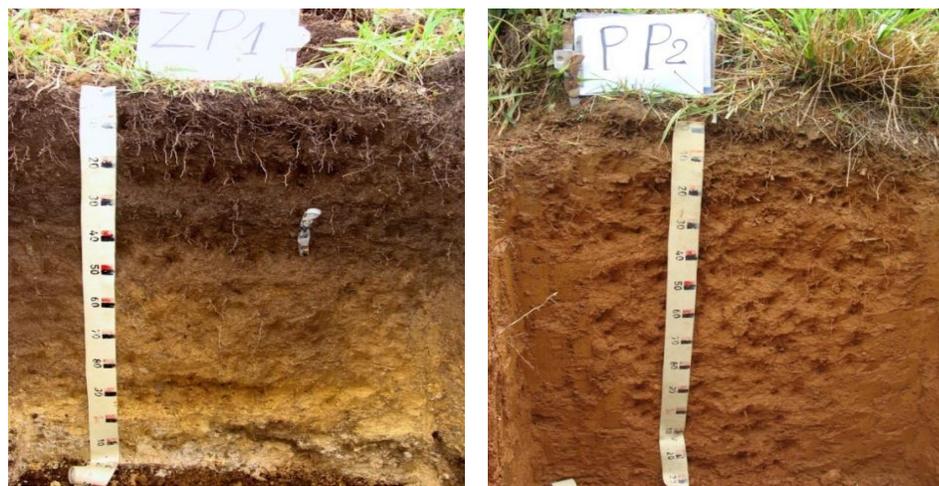
la capa superior del suelo. La reacción es muy fuertemente ácida, con valores de pH_{H_2O} entre 4,7 y 4,9. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) disminuye con la profundidad (3,48 a 1,74 $cmol(+)kg^{-1}$). El contenido de materia orgánica (MO), oscila entre 0,17% para el horizonte C y 3,8% para el horizonte Ap (Valarezo *et al* 2010).

Los Zapotes (Panguintza)

El segundo sitio experimental está ubicado en la finca “Los Zapotes” en la parroquia Panguintza del cantón Centinela del Cóndor, entre las coordenadas 9 5668110 y 9 5668160 O; y, 0741799 y 0741868 S, en un rango de altitud de 875 a 917 m s.n.m. El paisaje corresponde a pie de monte, el tipo de relieve es una vertiente y la forma del terreno es una ladera muy escarpada de 60% de pendiente promedio. El material parental

está constituido por rocas de lavas afánicas de color gris verdoso, identificadas como andesita y brechas tobáceas, que corresponden al Miembro Superior de la Formación Chapiza del Jurásico (DGGM 1989).

El suelo, *Typic Kandiuults*, no presenta los horizontes originales O, A y E, que han desaparecido por erosión. Hasta 120 cm de profundidad está constituido por los horizontes Ap, Bt21, Bt22, Bt23, de textura franco arcillo arenosa a arcillosa. Las raíces se concentran en la capa superior del suelo. La reacción es muy fuertemente ácida, con valores de pH_{H_2O} de 4,5 a 4,9. La acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$), aumenta con la profundidad (2,90 a 6,38 $cmol(+)kg^{-1}$). El contenido de materia orgánica (MO) oscila entre 0,9% para el horizonte Bt23 y 2,8% para el horizonte Ap. (Valarezo *et al.*, 2010)



(a)

(b)

Figura 2. Perfiles de suelo: (a) La Victoria – Zamora *Typic Kandihumults* y (b) Los Zapotes – Panguintza, *Typic Kandiuults* (USDA Soil Taxonomy 2010)

Las especies maderables indicadoras

Como especies arbóreas maderables indicadoras de rápido crecimiento se seleccionaron el pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) y la melina (*Gmelina arborea* Roxb.). El pachaco es un árbol leguminoso de rápido crecimiento, nativo de Centro y Sudamérica, de fuste recto, alcanza hasta 22 m de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) de alrededor de 1 m. Prefiere suelos húmedos pero bien drenados, con un rango de pH de 5 a 7,5 y una precipitación anual de 1 000 a 1 800 mm (Tropical Biology 2006).

Un importante beneficio de este árbol es que puede ser plantado para mejorar la fertilidad del suelo por sus altos niveles de producción de biomasa (Orwa 2006) Aporta nitrógeno al suelo y por su rápido crecimiento contribuye a la captura de CO₂ en un tiempo relativamente corto, en comparación con las maderas más duras. Su madera es de densidad liviana, pero tiene diferentes usos (contrachapados, aglomerados, enlistonados, pulpa, y como medio de aislamiento).

La melina es un árbol originario del Sudeste Asiático que ha sido introducido en diferentes partes del mundo. Se adapta a una diversidad de condiciones en un rango de precipitación anual de 750 – 5000 mm y temperatura anual de 20-28°C (Duke 1983; Jensen 1995). Es una especie que no tolera la sombra, por lo que necesita espacio para su dosel (World Agroforestry Centre 2000). Prefiere suelos bien drenados, con pH de 5 – 8, pero puede tolerar muchos suelos incluyendo los suelos ácidos fuertemente lixiviados y pobres (Duke 1983; Hossain 1999). Según CORMADERA (2002), bajo condiciones apropiadas de sitio es una de las especies de mayor crecimiento en el mundo.

Los frutos se emplean para la preparación de champú, el follaje joven es apetecido por los animales, sus flores son bastante melíferas, las hojas, los frutos y la corteza se utilizan con fines medicinales, produce carbón de elevado poder calorífico, su turno para pulpa es de 5 a 6 años y para madera de 12 años. Su madera es durable bajo el agua y se la usa para la construcción, tableros aglomerados, muebles, juguetes, fósforos, instrumentos musicales, esculturas y cajas de embalaje (Duke 1983; Hossain 1999).

El biocarbón

Se utilizó biocarbón de una sola fuente, elaborado mediante un proceso tradicional local del sector Santa Bárbara, de la parroquia Jimbilla, del cantón Loja, provincia de Loja, a partir del material leñoso de los siguientes árboles: 80% tábano (*Casearia sp.* familia Flacourtiaceae); y, 20% de cashco (*Weinmania fagaroides*), canelo (*Nectandra laurel* Nees) y capulí (*Prunus opaca* (Benth. Walp.)). No se dispone de información sobre la temperatura y condiciones de pirolisis en las que fue producido. El material obtenido fue molido de manera de garantizar un tamaño de partícula inferior a 0,5 cm (Bruno Glasser, comunicación personal).

Características de los experimentos

Los experimentos incluyen el estudio de tres factores: el primero corresponde a la determinación del crecimiento de las dos especies forestales (pachaco y melina). El segundo factor es el biocarbón evaluado en tres niveles: 0, 3 y 6 t ha⁻¹; y, el tercer factor es la fertilización, en dos niveles: Sin y Con 200 de N, 150 P, 200 K, 118 Mg, 183 S y 40 Zn kg/ha más 5 y 3 t ha⁻¹ de CaCO₃, en La Victoria – Zamora y Los Zapotes - Panguintza, respectivamente.

La dosis de carbonato de calcio para cada sitio experimental se estableció a partir de los promedios ponderados de los contenidos de Al^{3+} intercambiable y de materia orgánica, de las muestras tomadas de la capa de 00 a 25 cm de profundidad, aplicando la siguiente relación: 2 cmol(+)/kg de Ca^{2+} por cada 1 cmol(+)/kg de Al^{3+} (Sys 1979). La cal, los fertilizantes y el biocarbón se distribuyeron uniformemente en un círculo de 2,4 y 2 m de diámetro en La Victoria y en Los Zapotes, respectivamente. Luego se incorporaron homogéneamente hasta una profundidad de 25 cm.

El diseño del experimento correspondió a un arreglo factorial de (2 x 2 x 3), en parcelas sub-subdivididas, en bloques al azar, con doce tratamientos y cuatro repeticiones. Consecuentemente, cada bloque está formado por dos parcelas grandes para el factor especies arbóreas; a su vez, éstas se dividen en dos sub parcelas para los dos niveles de fertilización (sin y con), y dentro de éstas, se ubican las sub-sub parcelas que corresponden a los tres niveles de biocarbón. Cada sub-sub parcela contiene 16 plantas de una de las especies maderables, plantadas en cuadro a 3 x 3 m (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los Tratamientos, Factores y Niveles en estudio

Tratamientos	Factores	Niveles
T1 = A1F1 C1	Especies arbóreas	A1. Pachaco, Schizolobium parahybum
T2 = A1F2 C1	Cal y fertilización	A2. Melina, Gmelina arbórea
T3 = A1 F1C2		F1. 0 t cal / ha + 0 kg de nutrientes/ ha
T4 = A1 F2C2		F2. 2 cmol(+)/kg-1 Ca^{2+} por 1 cmol(+)/kg-1 Al^{3+} /100 g suelo (cal) + 200 kg/ha de N, 150 kg/ha de P, 200 kg/ha de K, 118 kg/ha de Mg, y 40 kg/ha de Zn, aplicados en una sola vez para cubrir la extracción total de la especie arbórea.
T5 = A1F1 C3		Biocarbón
T6 = A1F2 C3		C2. 3,0 t biocarbón/ha
T7 = A2F1 C1		C3. 6,0 t biocarbón/ha
T8 = A2 F2C1		
T9 = A2F1 C2		
T10= A2F2C2		
T11= A2F1C3		
T12 =A2F2C3		

A = Árbol maderable; F = Fertilización; C = biocarbón

Variables de respuesta

Para evaluar el crecimiento de los árboles y la producción de biomasa se viene midiendo tres variables: altura de planta desde la base del tallo, hasta el ápice final; diámetro basal del tallo medido a veinte centímetros del suelo; y, el diámetro a la altura del pecho (DAP).

Análisis estadístico

En el análisis de la varianza (ADEVA), las pruebas de significación y las curvas de regresión se ha utilizado el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008). Con la finalidad de comparar los dos sitios experimentales, se realizó el análisis de la varianza aplicando el siguiente modelo:

Factor (A) Sitios (La Victoria y Los Zapotes); Factor (B) Niveles de fertilización; y, Factor (C) Niveles de biocarbón.

En el Cuadro 2 se presentan los valores promedio de altura de planta, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho (DAP) de los doce tratamientos del experimento del sitio La Victoria – Zamora, a los dos años desde la plantación.

RESULTADOS

Crecimiento de las especies arbóreas en La Victoria - Zamora

Cuadro 2. *Valores promedio de altura de planta, diámetro basal y DAP del experimento en el sitio La Victoria - Zamora, a los dos años desde la plantación.*

Tratamientos	Altura (m)	Diámetro basal (cm)	DAP (cm)
T1 (Pachaco sin fertilización + 0 t/ha biocarbón)	3,2	6,2	4,6
T2 (Pachaco con fertilización + 0 t/ha biocarbón)	6,9	12,6	10,9
T3 (Pachaco sin fertilización + 3 t/ha biocarbón)	3,4	5,9	4,6
T4 (Pachaco con fertilización + 3 t/ha biocarbón)	7,2	13,0	11,3
T5 (Pachaco sin fertilización + 6 t/ha biocarbón)	4,4	8,5	6,6
T6 (Pachaco con fertilización + 6 t/ha biocarbón)	6,7	12,4	10,7
T7 (Melina sin fertilización + 0 t/ha biocarbón)	4,4	10,9	6,9
T8 (Melina con fertilización + 0 t/ha biocarbón)	6,4	16,4	11,6
T9 (Melina sin fertilización + 3 t/ha biocarbón)	4,3	11,2	7,0
T10 (Melina con fertilización + 3 t/ha biocarbón)	6,0	15,7	10,7
T11 (Melina sin fertilización + 6 t/ha biocarbón)	4,0	10,6	6,2
T12 (Melina con fertilización + 6 t/ha biocarbón)	6,6	15,8	11,0

Altura de planta

Los valores promedio de la altura de planta a los dos años desde la plantación en el experimento La Victoria – Zamora, se encuentran en el rango de 3,2 y 6,94 m para los tratamientos T1 (pachaco, sin fertilización + 0 t ha⁻¹ de biocarbón) y T2 (pachaco con fertilización + 0 t ha⁻¹ de biocarbón), respectivamente (Cuadro 2).

Los resultados del análisis de varianza se presentan en el Cuadro 3, en conjunto para todas las fechas de registro. Se incluyen los valores de cuadrados medios, como una expresión de la varianza de los efectos de los tratamientos aplicados y sus interacciones;

y, los valores del nivel de probabilidad estadística.

La mayoría de factores en estudio y sus interacciones en casi todas las fechas de registro no presentaron efectos significativos sobre la variable altura de planta, con excepción del factor fertilización, cuyos efectos fueron altamente significativos, (P <1%), en todas las fechas de registro. La respuesta diferenciada de crecimiento de las especies arbóreas, a los efectos de la fertilización se corrobora mediante la prueba de DMS, realizada para los promedios de altura de planta, y cuyos resultados son claramente dos rangos: con fertilización (a) y sin fertilización (b), (ver Cuadro 4).

Por otro lado, en esta misma localidad (La Victoria - Zamora), se encontraron evidencias de efectos significativos ($P < 5\%$), para la interacción Fertilizaciones x Especies arbóreas x Biocarbón, a los 250

días y diferencias significativas ($P < 10\%$), para los efectos de esta misma interacción, a los 190, 400 y 540 días desde la plantación, respectivamente (ver Cuadro 3 y Figura 3).

Cuadro 3. Análisis de varianza para la variable Altura de planta, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación, para el Sitio La Victoria -Zamora.

Fuente de variación	Cuadrados medios						Nivel de probabilidad (P)					
	190	250	300	400	540	720	190	250	300	400	540	720
Bloques	0,18	0,23	0,17	0,23	0,59	2,23	0,5872	0,7196	0,8043	0,7276	0,6079	0,4171
Especie arbórea	0,4	0,07	0,12	0,02	0,02	0,01	0,2789	0,7284	0,6584	0,9579	0,8754	0,9990
Error experimental (a)	0,23	0,49	0,51	0,50	0,83	1,72						
Fertilización	12,7	20,87	34,73	44,12	62,24	85,92	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0005	0,0013
Fertilización. x E. arbórea	0,01	0,01	0,07	0,28	2,60	4,47	0,9811	0,8615	0,6320	0,5286	0,2101	0,2447
Error experimental (b)	0,17	0,22	0,29	0,63	1,32	2,69						
Biocarbón	0,01	0,03	0,02	0,07	0,03	0,21	0,9019	0,8071	0,9923	0,7713	0,9432	0,7331
Fertilización x Biocarbón	0,07	0,21	0,19	0,49	1,03	0,21	0,4197	0,2064	0,4055	0,1816	0,1764	0,7268
E. arbórea x Biocarbón	0,06	0,11	0,05	0,20	0,30	0,45	0,4328	0,4196	0,7857	0,4828	0,5831	0,5143
E. arbórea x Fert. x Biocarbón	0,22	0,44	0,40	0,82	1,43	1,52	0,0669	0,0453	0,1559	0,0651	0,0983	0,1206
Error experimental (c)	0,07	0,13	0,20	0,27	0,54	0,66						
Coficiente de variación (%)	15,13	14,14	14,67	14,64	16,18	15,26						

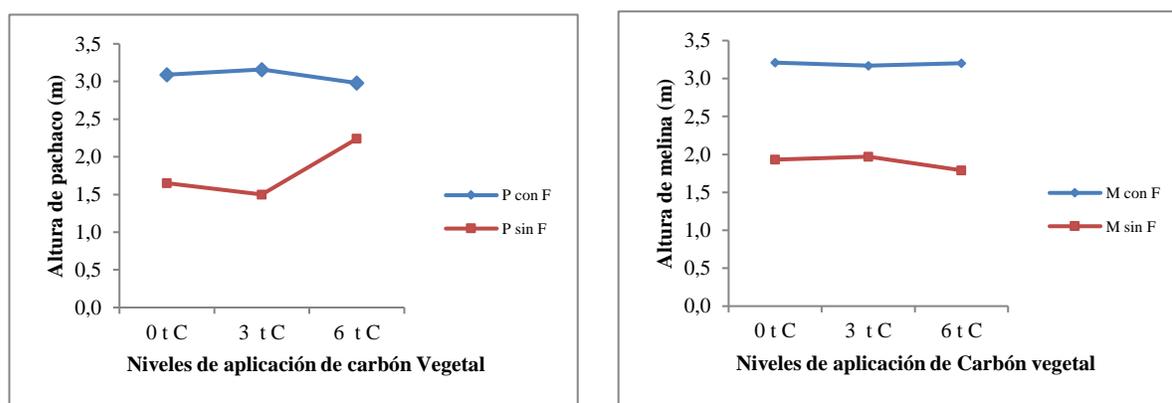


Figura 3. Representación de la Interacción doble: Especie arbórea x Fertilización x Biocarbón, para la variable Altura de planta, a los 250 días de la plantación, para el Sitio La Victoria. (P = pachaco *Schizolobium parahybum*; M = melina *Gmelina arborea*; F = fertilización).

Los modelos de crecimiento de las especies arbóreas, en función del tiempo y por efecto de los tratamientos, para los incrementos de

crecimiento en altura de planta, para las seis fechas de muestreo se ilustran en la Figura 4.

Cuadro 4. Promedios de Altura de planta por especie arbórea y nivel de fertilización, para seis fechas de muestreo desde la plantación, para el Sitio La Victoria - Zamora.

Días desde la plantación	Pachaco		Melina		Promedio	
	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización
190	2,40	1,25	2,53	1,32	2,30 (a)	1,27 (b)
250	3,10	1,80	3,38	2,00	3,17 (a)	1,85 (b)
300	3,75	2,27	4,03	2,41	3,89 (a)	2,19 (b)
400	4,25	2,65	4,54	2,97	4,50 (a)	2,58 (b)
540	5,51	3,43	5,78	3,92	5,68 (a)	3,40 (b)
730	6,49	3,91	7,02	4,58	6,65 (a)	3,97 (b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS ($P < 0,05$)

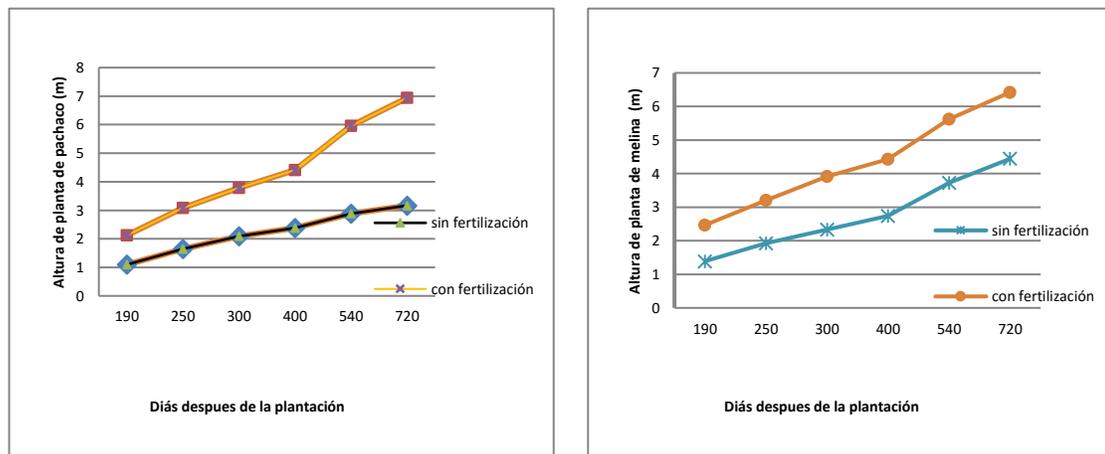


Figura 4. Crecimiento de las dos especies forestales, en función del tiempo, desde la plantación y diferenciadas por el efecto de la fertilización, para el Sitio La Victoria – Zamora.

Como se puede apreciar en la Figura 4, y en el Cuadro 4, a los dos años después de la plantación, el pachaco con y sin fertilización alcanzó una altura promedio de 6,49 y 3,91 m, respectivamente, con una diferencia de

2,58 m, equivalente a 66%. Por su parte, la melina con y sin fertilización alcanzó una altura promedio de 7,02 y 4,58 m, respectivamente, con una diferencia de 2,44 m, lo que equivale a 53%.

Cuadro 5. Resultados de los análisis de regresión para la variable crecimiento de árboles versus días desde la plantación, para el Sitio La Victoria – Zammora.

Variable y factores en estudio aplicados a la Regresión	Ecuación de regresión resultante	Estadísticos asociados al cálculo de la regresión
Crecimiento de Pachaco con fertilización versus días desde la plantación	Alt. planta = 0,82 + 0,01días	N = 24; R ² = 0,81; P = <0,0001
Crecimiento de Pachaco sin fertilización versus días desde la plantación	Alt. planta = 0,74 + 0,0037días	N = 24; R ² = 0,59; P = <0,0001
Crecimiento de Melina con fertilización versus días desde la plantación	Alt. planta = 1,42 + 0,01días	N = 24; R ² = 0,80; P = <0,0001
Crecimiento de Melina sin fertilización versus días desde la plantación	Alt. planta = 0,49 + 0,01días	N = 24; R ² = 0,87; P = <0,0001

En el Cuadro 5, se presentan los resultados de los análisis de regresión para pachaco con y sin fertilización y para melina con y sin fertilización, cuyas regresiones fueron significativas. En este mismo cuadro se muestran las ecuaciones de regresión lineal respectivas y los estadísticos asociados al cálculo. Además, a manera de ejemplo, la Figura 5 contiene la representación gráfica de la regresión lineal del pachaco con fertilización en función del tiempo desde la plantación.

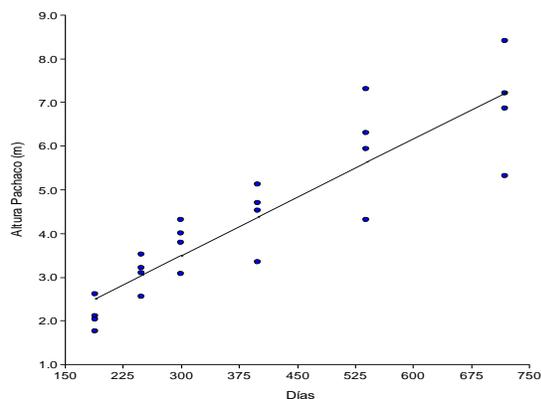


Figura 5. Curva de Regresión de Altura de planta de Pachaco con fertilización vs

Días después de la plantación, para el Sitio La Victoria – Zamora

Diámetro basal

Los valores promedio del diámetro basal (DB) a los dos años desde la plantación en el experimento de La Victoria – Zamora, se encuentran en el rango de 5,9 y 16,4 cm, para los tratamientos T3 (pachaco sin fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón) y T8 (melina con fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón), respectivamente (Cuadro 2). Es destacable la alta significancia (p < 1%) encontrada para los efectos del factor fertilización, en todas las fechas de registro. En el Cuadro 7, se presentan los promedios de DB de las especies arbóreas para los efectos de la fertilización, luego de haber aplicado la prueba de DMS: con fertilización (a) y sin fertilización (b).

En el caso del DB se observaron diferencias significativas (P < 5%), para los efectos del factor Especies forestales, en por lo menos tres fechas de muestreo: 300, 400 y 540 días después de la plantación, ver Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados del Análisis de varianza para la variable Diámetro basal, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación, para el Sitio La Victoria - Zamora.

F. de variación	Cuadrados medios						Nivel de probabilidad (P)					
	190	250	300	400	540	720	190	250	300	400	540	720
Bloques	1,47	2,19	2,59	2,53	6,31	10,23	0,307	0,271	0,308	0,424	0,355	0,298
Especies arbóreas	1,58	2,61	17,67	105,1	114,6	7,30	1	5	1	5	1	5
Error experimental (a)	0,78	1,01	1,37	1,99	3,95	5,24	0,249	0,206	0,037	0,005	0,012	0,323
Fertilización	69,9	115,9	163,6	287,0	307,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
Fertilización x E. arbórea	4	4	1	225,2	9	4	1	3	2	4	6	0
Error experimental (b)	0,08	0,12	0,08	0,03	1,06	4,97	0,780	0,817	0,869	0,939	0,705	0,480
Biocarbón	0,07	0,004	0,02	0,59	0,18	0,23	7	5	5	2	4	5
Fertilización X Biocarbón	0,12	0,54	0,51	1,45	3,88	1,09	0,806	0,993	0,982	0,650	0,935	0,890
E. arbórea x Biocarbón	0,25	0,62	0,40	1,58	0,88	2,55	5	3	0,705	1	6	4
E. arbórea x Fert x Biocarbón	0,94	1,63	1,45	3,82	5,62	3,42	0,705	0,450	0,605	0,355	0,253	0,579
Error experimental (c)	0,34	0,65	1,00	1,35	2,67	1,95	1	4	9	8	6	8
Coefficiente de variación (%)	14,5	9	13,62	13,90	12,77	15,43	0,484	0,398	0,674	0,326	0,723	0,288
	9	13,62	13,90	12,77	15,43	14,31	3	8	9	7	7	7
							0,083	0,102	0,078	0,143		
							7	8	0,257	5	7	0,194

Como se puede apreciar en el Cuadro 7, a los dos años después de la plantación, el pachaco con y sin fertilización alcanzó un DB promedio de 12,70 y 6,87 cm, respectivamente, con una diferencia de 5,63

cm, equivalente a 82%. Por su parte, la melina con y sin fertilización alcanzó un DB de 15,97 y 10,90 cm, respectivamente, con una diferencia de 5,07 cm, lo que equivale a 47%.

Cuadro 7. Análisis de promedios de Diámetro basal, por especie arbórea y nivel de fertilización, para seis épocas de muestreo, desde la plantación, para el Sitio La Victoria - Zamora.

Días desde la plantación	Pachaco		Melina		Promedio	
	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización
190	4,98	2,65	5,43	2,93	5,20 (a)	2,70 (b)
250	7,18	4,18	7,75	4,54	7,47 (a)	4,36 (b)
300	8,41	4,8	9,71	5,93	9,06 (a)	5,37 (b)
400	9,75	5,47	12,76	8,38	11,25 (a)	6,92 (b)
540	11,64	6,45	14,43	9,84	13,03 (a)	8,14 (b)
720	12,70	6,87	15,97	10,90	14,34 (a)	8,88 (b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS (P < 0,05)

Adicionalmente, se destaca la significación ($P < 10\%$), observada para la interacción Fertilización x Especies forestales x biocarbón, en por lo menos dos fechas de muestreo: 190 y 400 días después de la plantación.

Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Los valores promedio del DAP a los dos años desde la plantación en el experimento La Victoria - Zamora, se encuentran en el rango de 4,6 y 11,6 cm, para los tratamientos T1 (pachaco sin fertilización + 0 t ha⁻¹ de biocarbón) y T8 (melina con fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón), respectivamente (Cuadro 2). Únicamente existe diferencia altamente significativa para el factor de fertilización, no así para los factores especies arbóreas y dosis de biocarbón, ni para las interacciones fertilización x árbol, árbol x biocarbón, fertilización x biocarbón; y, árbol x fertilización x carbón. El CV es de 16,4 %.

Los valores del DAP del pachaco sin y con fertilización son de 5,28 y 10,9 cm, respectivamente, con un incremento de 5,62 cm, equivalente a 106%; en tanto que, para la melina los valores son de 6,71 y 11,12 cm, respectivamente, con un incremento de 4,41 cm, equivalente a 66%. El DAP promedio de planta (pachaco y melina) sin fertilización es de 6,0 cm y con fertilización 11,1 cm, con un incremento de 5,1 cm, equivalente a 84,3% (ver cuadro 8).

Cuadro 8. *Promedios de DAP por especie arbórea y nivel de fertilización a los dos años desde la plantación, para el Sitio La Victoria – Zamora.*

Espece	Nivel de Fertilización	DAP (cm)
Pachaco	Con fertilización	10,9
	Sin fertilización	5,28
Melina	Con fertilización	11,12
	Sin fertilización	6,71
Promedio de melina y pachaco	Con fertilización	11,1 (a)
	Sin fertilización	6,0 (b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS ($P < 0,05$)

Crecimiento de las especies arbóreas en Los Zapotes - Panguintza

En el cuadro 9 se presentan los valores promedio de altura de planta, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho de los doce tratamientos del experimento del sitio Los Zapotes – Panguintza, a los dos años desde la plantación.

Cuadro 9. *Valores promedio de altura de planta, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho del experimento Los Zapotes – Panguintza a los dos años desde la plantación*

Tratamientos	Altura (m)	D.	
		Basal (cm)	DAP (cm)
T1(Pachaco sin fertilización + 0 t/ha biocarbón)	6,60	11,14	8,2
T2 (Pachaco con fertilización + 0 t/ha biocarbón)	9,27	14,04	11,5
T3 (Pachaco sin fertilización + 3 t/ha biocarbón)	5,22	9,80	6,3
T4 (Pachaco con fertilización + 0 t/ha biocarbón)	7,64	13,84	11,2

Continúa...

T5 (Pachaco sin fertilización + 6 t/ha biocarbón)	5,17	9,41	6,6
T6 (Pachaco con fertilización + 6 t/ha biocarbón)	8,28	13,89	9,1
T7 (Melina sin fertilización + 0 t/ha biocarbón)	6,91	13,06	7,3
T8 (Melina + 0 t/Carbón+con fertilización)	7,74	15,84	8,3
T9 (Melina sin fertilización + 3 t/ha biocarbón)	5,49	11,84	5,5
T10 (Melina con fertilización + 3 t/ha biocarbón)	8,63	16,98	7,4
T11 (Melina sin fertilización + 6 t/ha biocarbón)	6,80	13,68	6,0
T12 (Melina con fertilización + 6 t/ha biocarbón)	7,54	16,20	8,3

Altura de planta

Los valores promedio de altura de planta a los dos años desde la plantación en el experimento Los Zapotes – Panguinza, se ubican en el rango de 5,22 y 9,27 m, para los tratamientos T3 (pachaco sin fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón) y T2 (pachaco con fertilización + 0 t ha⁻¹ de biocarbón), respectivamente (Cuadro 9).

Se encontró alta significación ($P < 1\%$), para los efectos de la fertilización sobre el crecimiento de las especies arbóreas la altura de planta, para las fechas de registro: 190, 254, 300, 430 y 547 días; mientras que, a los 721 días después de la plantación los efectos de la fertilización fueron significativos ($P < 5\%$), (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Análisis de varianza para la variable Altura de planta, en seis fechas de muestreo, en días después de la plantación, para el Sitio Los Zapotes - Panguinza.

F. de variación	Cuadrados medios						Nivel de probabilidad (P)					
	192	254	300	430	547	730	192	254	300	430	547	730
Bloques	0,17	0,41	0,51	0,85	0,92	2,14	0,832 1	0,802 3	0,631 2	0,730 8	0,706 9	0,819 3
Especies arbóreas	0,83	1,44	3,28	4,33	3,99	0,63	0,321 8	0,355 8	0,131 9	0,224 7	0,235 7	0,781 5
Error experimental (a)	0,59	1,21	0,77	1,86	1,82	6,91						
Fertilización	8,67	20,2 5	25,3 2	34,4 3	32,37	54,9 6	0,002 3	0,001 4	0,002 8	0,002 0	0,002 1	0,013 4
Fertilización x E. arbórea	0,31	0,89	1,18	0,86	1,20	3,90	0,376	0,285 3	0,335 3	0,443 7	0,356 9	0,391 8
Error experimental (b)	0,34	0,64	1,07	1,28	1,21	4,58						
Biocarbón	0,15	0,19	0,22	0,76	0,78	2,91	0,199 9	0,398 6	0,458 9	0,162 3	0,146 6	0,106 1
Fertilización x Biocarbón	0,02	0,15	0,07	0,01	0,06	0,26	0,663 5	0,375 0	0,592 8	0,850 4	0,700 9	0,656 8
E. arbórea x Biocarbón	0,02	0,11	0,06	0,19	0,25	2,96	0,904 7	0,616 4	0,848	0,714	0,604 0	0,101 7
E. arbórea x Fert x Biocarbón	0,03	0,02	0,05	0,01	0,02	0,42	0,549 4	0,929 4	0,889 8	0,897 8	0,827 0	0,572 8
Error experimental (c)	0,09	0,19	0,24	0,41	0,40	1,28						
Coefficiente de variación	19,7	17,6	15,9	15,3	14,72	16,0						

(%)	1	5	1	8
-----	---	---	---	---

La prueba de medias (DMS) para las medias con fertilización (a) y sin fertilización (b), para todas las épocas de muestreo se presenta en el Cuadro 11.

Cuadro 11. *Análisis de promedios de Altura de planta, por especie arbórea y nivel de fertilización, para seis fechas de muestreo desde la plantación, para el Sitio Los Zapotes - Panguintza.*

Días desde la plantación	Pachaco		Melina		Promedio	
	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización
192	2,14	1,12	1,58	1,04	3,42(a)	1,85 (b)
254	3,60	2,03	2,76	1,73	4,24(a)	2,47 (b)
300	4,37	2,61	3,42	2,34	4,80(a)	2,96 (a)
430	5,60	3,85	4,46	3,27	5,44(a)	3,48 (b)
547	5,77	4,00	4,56	3,42	5,56(a)	3,60 (b)
721	9,08	6,60	7,74	6,91	8,31(a)	5,60 (b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS (P < 0,05)

Una primera aproximación a los modelos de crecimiento de las especies arbóreas en función del tiempo y por efecto de los tratamientos se ilustra en la Figura 6, para los incrementos de crecimiento en altura de planta, para las seis fechas de registro. A los dos años el pachaco con y sin fertilización alcanzó una altura promedio de 9,08 m y

6,60 m, respectivamente, con una diferencia de 2,48 m, equivalente a 37,6%. Por su parte, la melina con y sin fertilización alcanzó una altura promedio de 7,74 y 6,91m, respectivamente, con una diferencia de 0,83 m, lo que equivale a 12,0% (Cuadro 11).

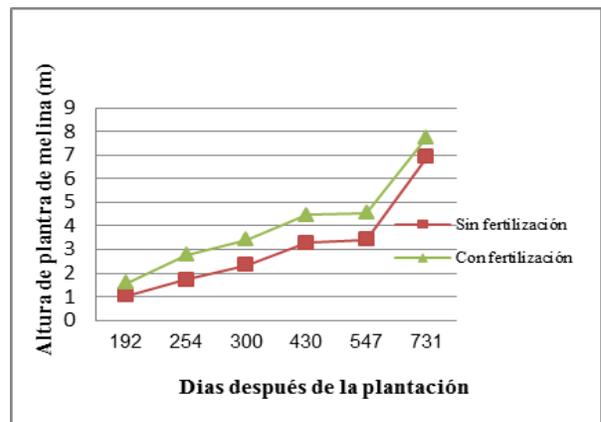
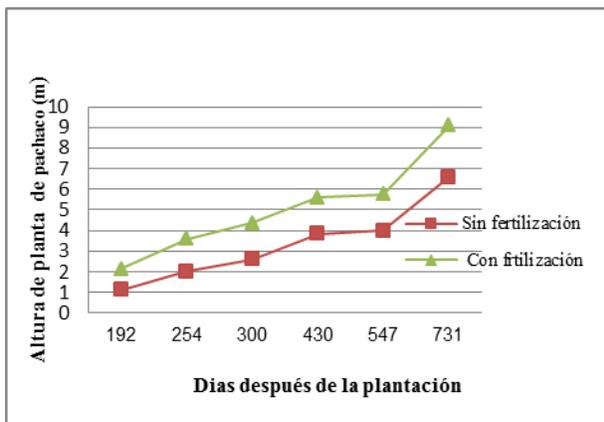


Figura 6. Crecimiento de las dos especies forestales, en función del tiempo, desde la plantación y diferenciadas por el efecto de la fertilización, para el Sitio Los Zapotes - Panguintza

En el Cuadro 12, se presentan los resultados de los análisis de regresión para pachaco y la melina con y sin fertilización, cuyas regresiones fueron significativas. También se muestran las respectivas ecuaciones de regresión lineal y los estadísticos asociados

al cálculo. Además, en la Figura 7 se muestra la representación gráfica de la regresión lineal de pachaco con fertilización, en función del tiempo desde de la plantación.

Cuadro 12. Resultados de los análisis de regresión para la altura de planta versus días desde la plantación, para el Sitio Los Zapotes – Panguintza.

Variable y factores en estudio aplicados a la Regresión	Ecuación de regresión resultante	Estadísticos asociados al cálculo de la regresión
Crecimiento de Pachaco con fertilización versus días desde la plantación	Altura. planta = 0,49 + 0,01días	N = 28; R ² = 0,77; P = <0,0001
Crecimiento de Pachaco sin fertilización versus días desde la plantación	Altura. planta = 0,42 + 0,01días	N = 28; R ² = 0,87; P = <0,0001
Crecimiento de Melina con fertilización versus días desde la plantación	Altura. planta = 0,02 + 0,01días	N = 28; R ² = 0,90; P = <0,0001
Crecimiento de Melina sin fertilización versus días desde la plantación	Altura de planta = 0,91 + 0,01	N = 28; R ² = 0,86; P = <0,0001

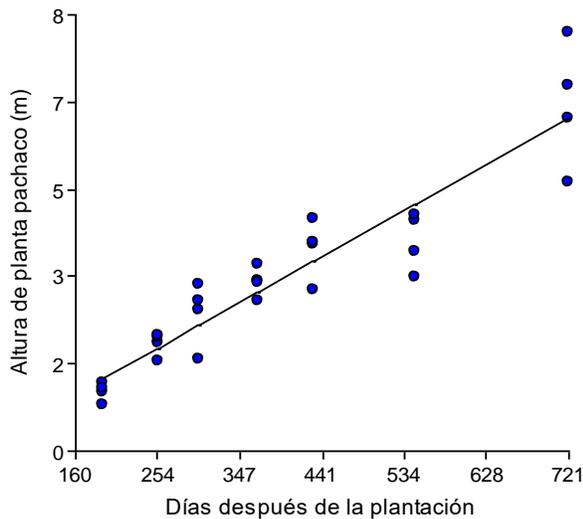


Figura 7. Curva de Regresión de Altura de planta de Pachaco con fertilización vs días después de la plantación, para el Sitio Los Zapotes - Panguintza.

Diámetro basal (DB)

Los valores promedio del DB a los dos años desde la plantación en el experimento Los Zapotes – Panguintza, se encuentran en el rango de 9,41 y 16,48 cm, para los tratamientos T5 (pachaco, sin fertilización + 6 t ha⁻¹ biocarbón) y T10 (melina, con fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón), respectivamente (Cuadro 9).

El análisis de varianza para esta variable (Cuadro 13) corroboró el efecto altamente significativo (p < 1%), del factor fertilización para todas las fechas de registro.

Cuadro 13. Resultados del Análisis de varianza para la variable, Diámetro basal, en seis fechas de registro, en días después de la plantación, para el Sitio Los Zapotes-Panguintza.

F. de variación	Cuadrados medios						Nivel de probabilidad (P)						730
	192	254	300	430	547	730	192	254	300	430	547		
Bloques	0,7	2,02	3,19	3,66	9,88	0,65	0,7983	0,6179	0,4773	0,1379	0,0623	0,9176	
Especies arbóreas	7,8	16,78	7,44	2,09	6,43	79,95	0,1458	0,0967	0,2115	0,2230	0,1090	0,0213	
Error experimental (a)	2,04	2,94	2,97	0,89	1,26	4,07							
Fertilización	33,95	75,95	67,26	82,9	120,40	159,3	0,001	0,001	0,0017	0,0021	0,0055	0,0043	
Fertilización x E. arbórea	1,3	1,05	0,64	2,71	1,24	0,33	0,2414	0,3451	0,6178	0,3852	0,6826	0,847	
Error experimental (b)	0,77	2,48	2,33	3,09	6,75	8,01							
Biocarbón	0,34	1,05	1,43	1,51	2,76	2,24	0,4835	0,3873	0,4268	0,4193	0,2168	0,3923	
Fertiliz. x Biocarbón	0,1	0,01	0,16	0,05	0,40	0,84	0,6233	0,9471	0,7457	0,8647	0,6369	0,5369	
E. arbór. x Biocarbón	0,14	0,83	0,67	1,75	1,40	2,38	0,7936	0,491	0,7184	0,3555	0,5016	0,3661	
E. arbórea x Fert. x Biocarbón	0,09	0,22	0,06	0,14	1,61	1,73	0,6350	0,6460	0,8407	0,7622	0,3445	0,3790	
Error experimental (c)	0,4	0,71	1,48	1,54	1,73	2,15							
Coficiente de variación (%)	22,67	16,83	21,01	13,35	11,72								

Las pruebas (DMS) para las medias con fertilización y sin fertilización se presentan en el Cuadro 14, del cual se desprende que el pachaco con y sin fertilización alcanzó un DB promedio de 14,04 y 11,14 cm, respectivamente, con una diferencia de 2,90

cm, equivalente a 26%. Por su parte, la melina con y sin fertilización alcanzó un DB de 15,84 y 13,060 cm, respectivamente, con una diferencia de 2,78 cm, lo que equivale a 21%.

Cuadro 14. Análisis de promedios de Diámetro Basal, por especie arbórea y nivel de fertilización, para seis fechas de muestreo, desde la plantación, para el Sitio Los Zapotes - Panguintza.

Días desde la plantación	Pachaco		Melina		Promedio	
	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización	Con fertilización	Sin fertilización
192	4,04	2,18	2,70	1,72	3,65 (a)	1,96 (b)
254	6,98	4,26	5,31	3,43	6,27 (a)	3,75 (b)

Continúa...

300	7,81	5,33	6,29	4,49	6,98 (a)	4,61 (b)
430	10,82	8,22	9,95	8,29	10,62 (a)	7,99 (b)
547	13,00	10,14	13,04	10,04	12,81 (a)	9,64 (b)
721	14,04	11,14	15,84	13,06	15,13 (a)	11,49 (b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS ($P < 0,05$)

Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Los valores promedio del DAP se encuentran en el rango de 5,5 y 11,5 cm, para los tratamientos T9 (melina sin fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón) y T2 (pachaco con fertilización + 0 t ha⁻¹ de carbón), respectivamente (Cuadro 9). El ADEVA evidenció diferencia altamente significativa únicamente para el factor fertilización. El CV es de 20,1%. Según la prueba de Tukey, el DAP promedio del pachaco y la melina es de 6,6 y 9,5 cm para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente, equivalente a un incremento de 44%. Los valores de DAP del pachaco sin y con fertilización son de 7,05 y 10,66 cm, respectivamente, con un incremento de 3,61 cm, equivalente a 51%. Para la melina los valores son 6,26 y 8,26 cm, respectivamente, con un incremento de 2,0 cm (Cuadro 15).

Cuadro 15. *Promedios de DAP por especie arbórea y nivel de fertilización a los dos años desde la plantación, para el Sitio Los Zapotes - Panguintza.*

Especie	Nivel de Fertilización	DAP (cm)
Pachaco	Con fertilización	10,66
	Sin fertilización	7,05
Melina	Con fertilización	8,26
	Sin fertilización	6,26
Promedio (pachaco y melina)	Con fertilización	9,46(a)
	Sin fertilización	6,65(b)

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS ($P < 0,05$)

Comparación del crecimiento del pachaco y la melina en los dos sitios

Los valores de los cuadrados medios y del nivel de probabilidad resultantes del análisis de varianza para las variables *Altura de Planta*, *Diámetro Basal (DB)* y *Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)*, para el pachaco y la melina en los sitios experimentales (La Victoria - Zamora y Los Zapotes - Panguintza) a los dos años después de la plantación se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. *Análisis de varianza para altura de planta, diámetro basal y DAP por especie arbórea y sitio de experimentación, dos años después de la plantación.*

Fuente de variación	Pachaco						Melina					
	Altura de planta (cm)		Diámetro basal (cm)		DAP (cm)		Altura de planta (cm)		Diámetro basal (cm)		DAP (cm)	
	CM	P	CM	P	CM	P	CM	P	CM	P	CM	P
Bloques	2,46	0,5433	2,79	0,5165	3,61	0,4234	3,96	0,4829	7,52	0,5093	8,46	0,4560

Continúa...

Sitios	32,7 2	0,0422	59,99	0,020	63,6 0	0,01 78	42,47	0,043	16,28	0,24 29	1,45	0,6877
Error experimental (a)	2,82		2,94		2,83		3,75		7,74		7,36	0,0145
Fertilización	107, 8	0,001	278,89	0,001	248, 2	0,00 1	39,66	0,001	219,52	0,00 1	166, 17	0,0028
Fertilización*Siti o	0,99	0,4428	12,18	0,078	16,0 4	0,19 87	0,74	0,3308	7,64	0,00 26	5,82	0,3969
Error experimental (b)	6,24		9,01		7,69		2,25		12,45		6,99	0,0058
Biocarbón	1,42	0,4310	0,82	0,8012	0,74	0,75 63	0,27	0,6974	0,1	0,94 37	1,74	0,3774
Fert*Biocarbón	0,11	0,9361	2,01	0,5848	1,93	0,48 84	1,13	0,2402	0,94	0,57 84	1,22	0,5006
Sitio*Biocarbón	3,86	0,1143	4,16	0,3353	4,31	0,21 33	0,001 4	0,9981	1,04	0,54 56	0,55	0,7282
Sitio*Fert*Bioca rbón	1,79	0,350	5,08	0,2663	3,19	0,31 25	2,93	0,032	3,74	0,12 81	1,99	0,3292
Error experimental (c)	1,64		3,65		2,61		0,75		1,86		1,71	
Coef. de variación (%)	20,8 8		17,53		17,4		13,88		9,73		14,3 9	

CM = Cuadrado medio; P = Nivel de probabilidad

Cuadro 17. Análisis de promedios de altura de planta, diámetro basal y DAP, por especie arbórea y sitio de experimentación, a los dos años después de la plantación.

Sitio	Altura planta	Pachaco Diámetr o basal	DAP	Altura planta	Melina Diámetro basal	DAP
Efectos Independientes (Prueba DMS, P<5%)						
Los Zapotes	6,96 (A)	12,02 (A)	10,44(A)	7,19 (A)		
La Victoria	5,31 (B)	9,78 (B)	8,14 (B)	5,31 (B)		
Con fertilización	7,63 (A)	13,31 (A)	11,56 (A)	7,2 (A)	16,16 (A)	10,95(A)
Sin fertilización	4,63 (B)	8,49 (B)	7,01 (B)	5,34 (B)	11,88 (B)	7,23 (B)
Interacción doble: Sitio * Fertilización (Prueba Tukey P<5%)						
Los Zapotes con fertilización					16,34 (A)	
La Victoria con fertilización					15,97(A)	
Los Zapotes sin fertilización					12,86 (AB)	
La Victoria sin fertilización					10,90 (B)	
Interacción triple: Sitio * Fertilización *Biocarbón (Prueba Tukey P<5%)						
Los Zapotes con fertilización con Biocarbón 1						7,75 (A)

Continúa...

Los Zapotes con fertilización con Biocarbón 2	8,64(AB)
Los Zapotes con fertilización con Biocarbón 3	7,54 (ABC)
Los Zapotes sin fertilización con Carbón 1	6,91(ABC)
Los Zapotes sin fertilización con Biocarbón 2	5,49(CDEF)
Los Zapotes sin fertilización con Biocarbón 3	6,43(BCDE)
La Victoria con fertilización con Biocarbón 1	4,44(DEF)
La Victoria con fertilización con Biocarbón 2	6,02(BCDE F)
La Victoria con fertilización con Biocarbón 3	6,57 ABCD
La Victoria sin fertilización con Biocarbón 1	4,44 DEF
La Victoria sin fertilización con Biocarbón 2	4,33 EF
La Victoria sin fertilización con Biocarbón 3	4,05 F

Letras iguales significan diferencias no significativas.

Altura de planta

En el pachaco, existe diferencia significativa para el factor sitios y altamente significativa para el factor fertilización. El CV es de 20,9%. La media de altura del pachaco es de 7,0 m en Los Zapotes, frente a 5,3 m en La Victoria, con un incremento de altura 31,1%.

En la melina, existe diferencia significativa para el factor sitios y altamente significativa para el factor fertilización. El CV es de 13,9%. La media de altura es de 7,2 m en Los Zapotes y de 5,3 en La Victoria, con un incremento equivalente al 35,4%. (Ver Figura 8)

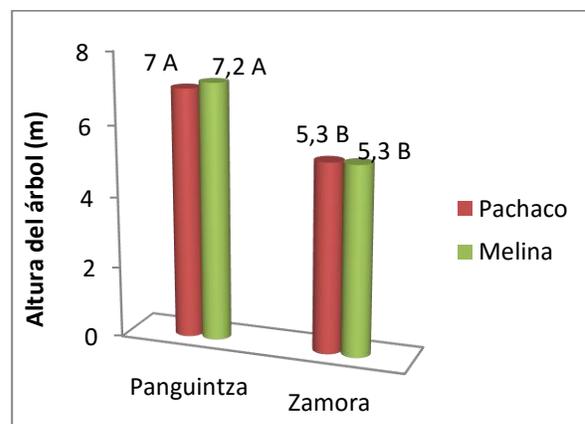


Figura 8. Altura del pachaco y la melina en los sitios La Victoria – Zamora y Los Zapotes – Panguintza, a los dos años después de la plantación

Cuadro 18. Análisis de promedios de Altura, Diámetro Basal y DAP, por sitio y por especie arbórea, a los dos años después de la plantación-

Variable	La Victoria (Zamora)		Los Zapotes (Panguintza)		Promedio		
	Pachaco	Melina	Pachaco	Melina	Pachaco	Melina	
Altura (m)	5,3	5,3	7,0		7,2	6,1	6,3
D Basal (cm)	9,8	13,4	12,0		14,6	10,9	14,0
DAP (cm)	8,1	8,9	8,9		7,3	8,5	8,1

Letras iguales significan diferencias no significativas. Prueba de DMS (P < 0,05)

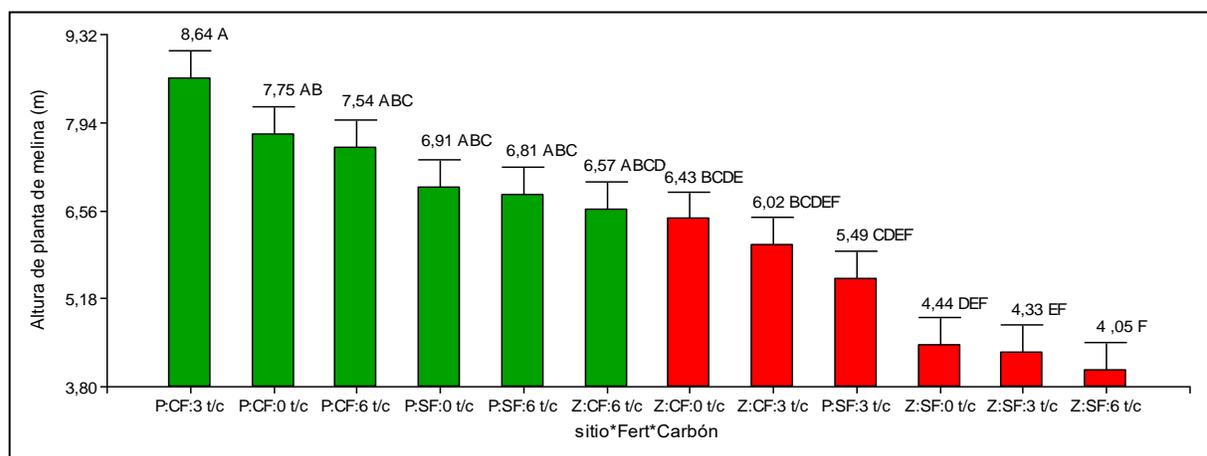


Figura 9. Representación de la interacción sitio*fertilización*niveles de biocarbón sobre la altura de planta de melina a los dos años después de la plantación (P:CF = Panguintza con fertilización; P:SF = Panguintza sin fertilización; Z:CF = Zamora con fertilización; Z:SF: Zamora sin fertilización).

La Figura 9 permite deducir que el mejor tratamiento corresponde al sitio Los Zapotes – Panguintza, con fertilización + 3 t ha⁻¹ de biocarbón (8,64 m); en tanto que, el de menor altura corresponde al sitio La Victoria – Zamora, sin fertilización + 6 t ha⁻¹ de biocarbón (4,05 m), con un incremento que equivale a 113%.

Diámetro Basal (DB)

Se evidencia diferencia significativa en cuanto al DB del pachaco a los dos años después de la plantación, para el factor sitios y altamente significativa para el factor fertilización. El CV es de 17,5%. La media

del DB del pachaco es de 12,0 cm en Los Zapotes - Panguintza y de 9,8 cm en La Victoria - Zamora, con un incremento de 22,9%. No se encontró diferencia significativa en la melina para el factor sitios; en cambio, existe diferencia altamente significativa para el factor fertilización. El CV es de 9,7%.

Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)

En el pachaco, a los dos años después de la plantación para el DAP se tiene diferencia altamente significativa únicamente para el factor fertilización. El CV es de 17,4%. En cambio, en la melina se tiene diferencia

altamente significativa para el factor fertilización y para la interacción fertilización*sitio. El CV es de 13,9%. Según la Figura 10, el DAP de la melina con fertilización para La Victoria – Zamora es de 11,1 cm frente a 8,3 cm en Panguintza, con

una diferencia equivalente al 33,7%. En cambio, el DAP en los tratamientos sin fertilización son estadísticamente iguales (6,7 y 6,3 cm en Los Zapotes – Panguintza y La Victoria – Zamora, respectivamente).

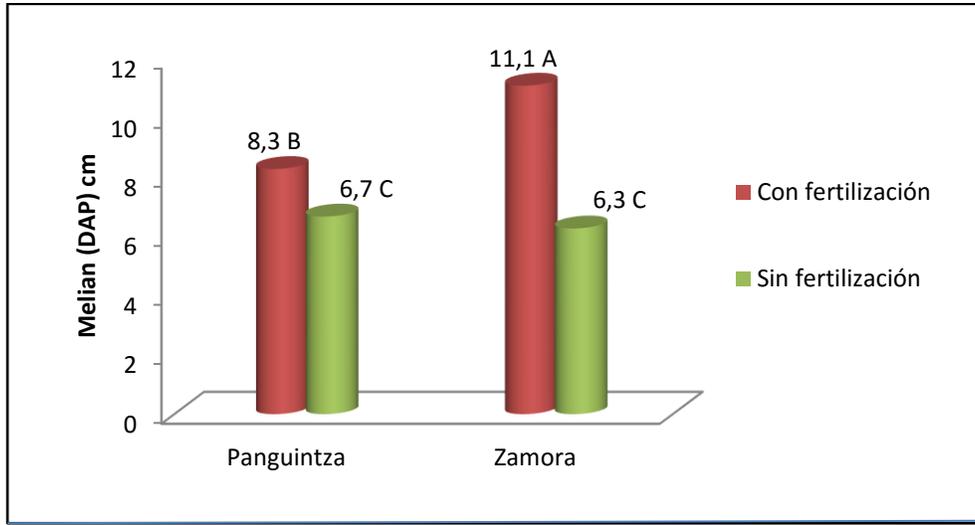


Figura 10. Diámetro a la altura del pecho (DAP) de la melina en La Victoria – Zamora y Los Zapotes – Panguintza, sin y con fertilización, a los dos años después de la plantación.

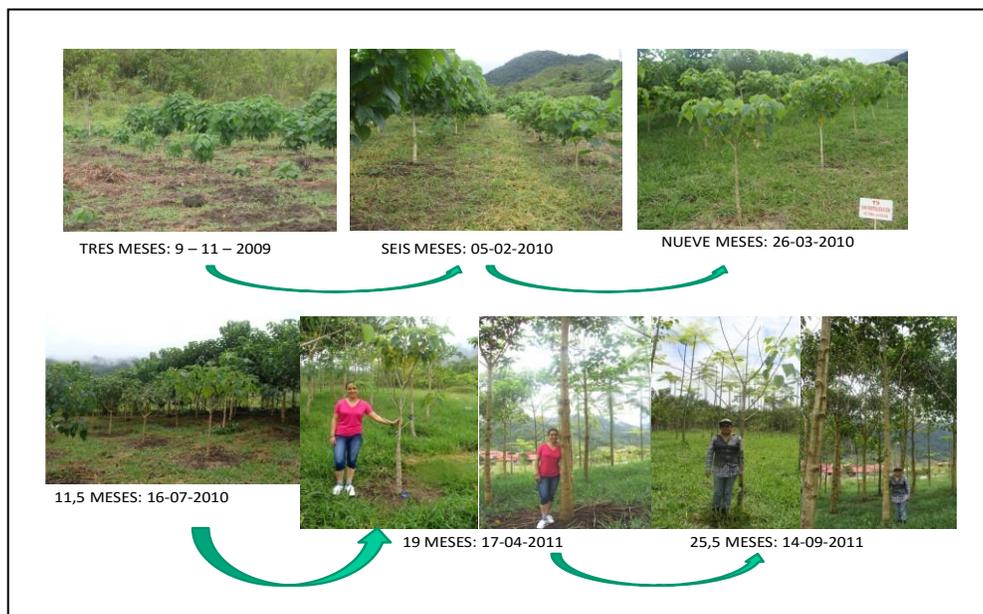


Figura 11. Evolución del crecimiento de la melina en La Victoria – Zamora, sin y con fertilización.

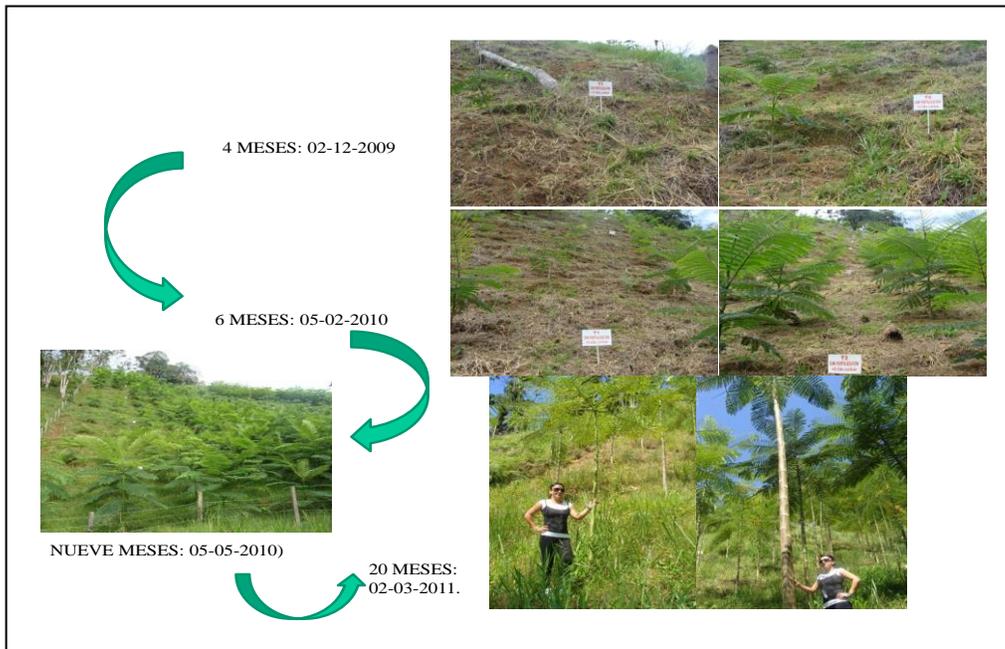


Figura 12. Evolución del crecimiento del pachaco Los Zapotes – Panguintza, sin y con fertilización.

DISCUSIÓN

Variables de crecimiento

En los dos sitios los efectos de la fertilización han sido altamente significativos para las variables altura de planta, diámetro basal y DAP; pero no se ha detectado ninguna significación de los efectos de los otros factores en estudio ni sus interacciones, incluyendo la aplicación de biocarbón.

La significación de los efectos del factor fertilización se confirma con las pruebas de medias (DMS), ubicándose las medias en dos rangos, con fertilización (a) y sin fertilización (b), en forma reiterativa, para todas las fechas de registro.

Las diferencias de las variables de crecimiento observadas independientemente en los dos sitios en estudio para todas las fechas de registro durante los dos años por

efecto de la fertilización se podrían atribuir a la acción combinada de los nutrientes aplicados (N, P, K, Ca, Mg, S, Zn) y del carbonato de calcio que neutraliza el aluminio soluble y, de esta forma, facilita la absorción de los nutrientes, especialmente el fósforo, que como es sabido es precipitado por la acción del aluminio.

Los mismos fenómenos mencionados podrían explicar la no significancia de las diferencias de crecimiento entre especies arbóreas. Ambas especies tienen suficientes nutrientes disponibles en el suelo por la aplicación del nivel de fertilización F2 y no tienen disponibilidad por la aplicación del nivel de fertilización F1, que es el testigo; y, por lo tanto, su crecimiento es similar, en cada condición de fertilización.

Con respecto a los incrementos de crecimiento en altura de planta para las diferentes fechas de registro (ver Figuras 2 y 4), se observa que los modelos de

crecimiento determinados hasta ahora son muy similares para las dos especies, pero, se reitera, que el efecto de la fertilización fue muy significativo durante todas las fechas de registro. Claramente, el crecimiento observado hasta ahora para las dos especies sugiere un modelo de respuesta de tipo lineal, lo cual aparentemente es muy lógico, ya que las mediciones se han hecho en las etapas que podrían considerarse como juveniles de ambas especies y que precisamente son etapas de crecimiento o de acumulación de biomasa en forma lineal creciente con el tiempo. Ello lo confirman también las regresiones significativas de la relación de la variable Altura de planta en función del tiempo, en días desde la plantación para pachaco con y sin fertilización y para melina con y sin fertilización y la regresión lineal de pachaco con fertilización que se representa en la Figura 5 para el experimento de Los Zapotes - Panguintza.

Un aspecto que merece mencionarse es la tasa de crecimiento diario de las especies arbóreas en los dos experimentos en su fase inicial. Así, en La Victoria – Zamora la tasa de crecimiento del pachaco en el periodo febrero – abril de 2010 en los tratamientos con fertilización fue de 1,52 a 1,70 cm día⁻¹, frente a 0,97 cm día⁻¹ de aquellos sin fertilización. Para la melina los valores fueron de 1,39 a 1,51 cm día⁻¹, frente a 0,94 cm día⁻¹, en los tratamientos con y sin fertilización, respectivamente. En el mismo periodo, en Los Zapotes - Panguintza el crecimiento del pachaco en los tratamientos fertilizados fue de 1,9 a 2,2 cm día⁻¹ frente a 1,5 cm día⁻¹, de los no fertilizados; en cambio, para la melina los valores fueron 1,55 y 1,2 cm día⁻¹, para los tratamientos con y sin fertilización, en su orden.

Las alturas promedio del pachaco con fertilización a los dos años después de la plantación en La Victoria- Zamora (6,49 m) y en Los Zapotes Panguintza (9,08 m), que equivalen a tasas de crecimiento anual de 3,2 y 4,5 m, respectivamente, son superiores a aquellas de 2 a 3 m que para esta especie reportan Orwa (2009) y Leopold (2001). Ello no sucede en los árboles de los tratamientos sin fertilización, algunos de los cuales incluso murieron en el experimento de La Victoria Zamora.

Según Hossain (1999) la melina tiene una tasa de crecimiento de alrededor de 3 a 4 m por año. En este rango se ubican las tasas de crecimiento anual registradas a los dos años de la plantación en La Victoria-Zamora (3,5 m a⁻¹) y en Los Zapotes Panguintza (3,8 m a⁻¹) en los tratamientos con fertilización; no así, en los tratamientos sin fertilización.

En cambio, los valores de altura promedio de la melina a los dos años después de la plantación en los tratamientos con fertilización en la Victoria-Zamora y en Los Zapotes- Panguintza (7,0 y 7,7 m, respectivamente) son notoriamente mayores a 5,3 m que reportan Otsamo *et al* (1995) para esta especie a los 36 meses para el tratamiento con laboreo y aplicación de NPK. Por su parte, Onyekwelu *et al* (2003) encontraron una altura promedio para la melina de 14,1 m a los cinco años (2,82 m a⁻¹).

Cabe mencionar que los valores de DAP promedio de la melina a los dos años después de la plantación en los tratamientos con fertilización en la Victoria-Zamora y en Los Zapotes- Panguintza (11,6 y 8,3 cm, respectivamente) son mayores a 7,2 cm que reportan Otsamo *et al* (1995) para esta especie a los 36 meses para el tratamiento

con laboreo y aplicación de NPK. Por su parte, Onyekwelu *et al* (2003) encontraron una DAP promedio para la melina de 15,1 cm a los cinco años.

La Victoria (Zamora) vs Los Zapotes (Panguintza)

La diferencia significativa para el factor sitios de la variable altura de planta a los dos años después de la plantación, tanto para el pachaco como para la melina, refleja mejores condiciones de fertilidad del suelo (física y química) en Los Zapotes – Panguintza (andesita y brechas tobáceas) que en La Victoria – Zamora (granodiorita con alto contenido de cuarzo). Ello lo corrobora también la media de altura de pachaco a los dos años desde la plantación que es de 7,0 m en Los Zapotes-Panguintza, frente a 5,3 m en La Victoria-Zamora, con un incremento de altura 31,1%; y, la media de altura de la melina que es de 7,2 m en Panguintza y de 5,3 en Zamora, con un incremento altura equivalente al 35,4%. También, es de hacer notar que la diferencia altamente significativa de la interacción fertilización*sitio para los valores del DAP de la melina, indica que esta especie respondió mejor a la fertilización en el sitio Los Zapotes – Panguintza.

Al respecto, si se parte del hecho de que el clima en ambos sitios es similar, que la pendiente del terreno en La Victoria – Zamora es de 12% y en Los Zapotes – Panguintza de 60%; y que, en este último sitio la capa orgánica y el horizonte Ap se han perdido por erosión, las mejores condiciones de fertilidad del suelo se atribuirían al efecto del material parental. En primer lugar, por una mayor reserva de nutrientes provenientes de la andesita, particularmente del boro, el mismo que es

más abundante en las rocas volcánicas que en las plutónicas, y que en los suelos de textura gruesa de las áreas lluviosas (La Victoria – Zamora) se lixivia del perfil (Dinauer 1977). En segundo lugar, por una mayor retención del agua aprovechable en Los Zapotes – Panguintza (por ser de textura más fina), dado que a lo largo de los dos años en los experimentos se han registrado importantes períodos de falta de lluvia, principalmente en la temporada de septiembre – diciembre cuando el efecto Föhn inhibe la precipitación en la zona (Rollentbeck and Bendix 2010), por lo que se asume que en la Victoria – Zamora se retuvo menos agua que en Los Zapotes – Panguintza, particularmente en la capa de 00 – 25 cm en la cual se encuentra la mayor proporción de las raíces, debido al patrón de enraizamiento de las especies arbóreas en los bosques húmedos del sur del Ecuador (Soethe *et al* ., 2006).

En cuanto a la variable diámetro basal, únicamente para el pachaco se registra diferencia significativa para el factor sitios; mientras que, para la variable DAP, las dos especies no manifiestan todavía diferencias significativas para el factor sitios a los dos años después de la plantación, lo cual conduciría a señalar que las dos especies arbóreas crecieron más en altura antes que en el diámetro del tronco, lo cual es normal, dado que se encuentran en su etapa juvenil de crecimiento.

En las dos especies y en los dos sitios se mantiene la diferencia altamente significativa para las variables altura de planta, diámetro basal y DAP, en las dos especies para el factor fertilización, lo cual denota que los suelos de los dos sitios han requerido el aporte tanto de la cal para neutralizar el aluminio soluble, como del

grupo de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S y Zn) para suplementar las deficiencias. Ello ha determinado un crecimiento de las dos especies en los dos años en grado tal que, de haber sido destinadas para pulpa de papel estarían en edad de corte, frente a 5 o 6 años que es la edad normal (Mario Añazco, comunicación personal). En tanque que, en Las reservas forestales de Oluwa y Omo de Nigeria, las plantaciones de melina en suelos tropicales degradados se han establecido para un turno de pulpa de madera de 8 a 10 años (Onyekwelu *et al.*, 2006).

Efecto del biocarbón

En los dos sitios hasta los dos años después de la plantación no se observan diferencias del efecto de la aplicación de 3,0 o 6,0 t ha⁻¹ del biocarbón. Al respecto, la respuesta de los cultivos a las enmiendas con biocarbón dependen de las propiedades físicas y químicas de éste, las condiciones climáticas, las condiciones del suelo y el tipo de cultivo (Yamato *et al.* 2006, Zwiten *et al.* 2010, Gaskin *et al.* 2010, Haefele *et al.* 2011). Varios autores han reportado efectos agronómicos tanto positivos como negativos de las aplicaciones de enmiendas de biocarbón en los suelos (Lehmann *et al.* 2003; Novak *et al.* 2009; Atkinson *et al.* 2010; Major *et al.* 2010; Lehmann *et al.* 2011; Spokas *et al.* 2011). Ello sugiere que la aplicación de biocarbón al suelo no es una enmienda de talla única (Spokas *et al.* 2011), sino más bien requiere de consideraciones cuidadosas de sus propiedades relacionadas con cada material particular y cómo esas propiedades pueden remediar una deficiencia específica (Novak y Bussher 2011).

Consecuentemente, se debe reconocer que la naturaleza química y la composición del

biocarbón varía ampliamente, debido a que consiste en una colección heterogénea de estructuras carbonizadas, elementos inorgánicos entrampados, así como estructuras químicas heredadas del material de origen (Brewer *et al.* 2009; Keiluwet *et al.* 2010; Spokas *et al.* 2011). Esta variabilidad es evidente cuando se examina la información sobre la composición orgánica e inorgánica del biocarbón (Spokas 2011). Incluso biocarbones obtenidos del mismo material, bajo condiciones similares de pirolisis, pero en unidades diferentes, pueden variar en sus características químicas. Además, diferencias en las propiedades físicas y químicas pueden resultar del tamaño de la partícula en el mismo tipo de biocarbón (Nocentini *et al.* 2010; Francioso *et al.* 2011).

La composición de los grupos superficiales es una característica importante para la exitosa utilización del biocarbón como enmendador de suelos, y podría ayudar en la comprensión de la respuesta tardía de las enmiendas de carbón que ocasionalmente se han observado (Cheng *et al.* 2008; Major *et al.* 2010; Ascough *et al.* 2011). Esto podría explicar la aún no evidente respuesta de pachaco y melina a las dosis de biocarbón en los dos experimentos. En este contexto, es pertinente hacer referencia a los resultados reportados por Kimetu *et al.* (2008) en un Ultisol degradado de Kenia, que indican que la producción acumulativa de maíz se duplicó después de tres aplicaciones repetidas de 7 t ha⁻¹ de biocarbón a lo largo de dos años. Sin embargo, Major *et al.* (2010) no encontraron cambio en la producción de maíz en el primer año, pero si un aumento significativo en el subsecuente tercer año después de la aplicación de una dosis única de 20 t ha⁻¹ de biocarbón de madera en un Oxisol en la Sabana Colombiana.

Las dosis de 3 y 6 t ha⁻¹ de biocarbón utilizada en los tratamientos podrían considerarse adecuadas si se toma en cuenta que Solaiman *et al.* (2010) reportan que la aplicación de 6 t ha⁻¹ de biocarbón en combinación fertilizantes solubles, en un suelo franco arcillo arenoso, evidenció incrementos significativos en la producción de trigo, habiéndose también observado incrementos significativos del rendimiento cuando las dosis de biocarbón (1,5, 3,0 y 6,0 t ha⁻¹) fueron aplicadas con fertilizantes minerales inoculados.

Coincidiendo con Jones *et al.* (2011) estas diferencias de comportamiento del biocarbón enfatizan la necesidad de realizar experimentos de campo de largo plazo en el compromiso de generar información pertinente para la utilización de este material.

CONCLUSIONES

En los dos sitios los efectos de fertilización (N, P, K, Mg, S y Zn más la cal), han sido altamente significativos para las tres variables de las especies arbóreas indicadoras (pachaco y melina): altura de planta y diámetro basal y DAP, durante todas las fechas de registro a lo largo de los dos años desde la plantación. En los dos sitios experimentales los valores de altura de planta y de DAP de las dos especies arbóreas indicadoras son notoriamente mayores a aquellas que reportan otros investigadores para éstas en otras partes del mundo.

A los dos años después de la plantación existe diferencia significativa para el factor sitios siendo las medias de altura de planta y diámetro basal mayores en Los Zapotes - Panguintza que en La Victoria – Zamora, lo

cual se atribuye a la calidad del material parental del suelo. Los crecimientos y acumulación de biomasa de melina (por la constante ramificación), superan a los de pachaco (no ramifica y produce foliolos que se autodefolian) en los dos sitios en estudio. Los efectos del biocarbón todavía no son contundentes ni consistentes para el crecimiento de las especies arbóreas indicadoras.

Un aspecto a considerarse con mucho augurio es que en los dos experimentos el turno para pulpa de las especies arbóreas indicadoras con la aplicación de nutrientes y cal es de 2 años, frente a 5 o 6 años y hasta más, que se reporta para otras localidades; entonces, se habría encontrado una alternativa de uso productivo de los suelos en una actividad compatible con su aptitud natural.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (SENESCYT) por el co-financiamiento del proyecto; al Batallón de Selva BS 62 y al señor Héctor Ochoa por haber concedido los terrenos para la instalación de los experimentos; y, a la Ing. Jackeline Castillo por los análisis de laboratorio.

REFERENCIAS

- Ascough PL, Bird MI, Francis SM, Thornton B, Midwood AJ, Scott AC, Apperley D (2011). *Variability in oxidative degradation of charcoal: influence of production conditions and environmental exposure*, Geochim Cosmochim Acta 75(9)2361-2378.
- Aspden J, Litherland M. (1990) *Cordillera Real*. IV Informe, citado en INSTITUTO

- ECUATORIANO DE MINERIA (DGGM) 1996. *Mapa geológico del Ecuador*. Hojas de Paquisha y Zamora. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.
- Atkinson C, Fitzgerald J, Hipps. (2010) *Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar applications to temperate soils: a review*. *Plant Soil* 337(1):1-18
- Brewer CE, Schmidt-Rohr K, Satrio JA, Brwon RC. (2009) *Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems*. *Environ Progr Sust Energy* 28(3):386-396
- Cheng CH, Lehmann J, Thies JE, Burton SD. (2008) *Stability of black carbon in soils across a climatic gradient*. *J. Geophys Res* 113
- Cochrane T, Sanchez P. (1980). *Land resources, soil properties and their management in the Amazon region: a state of knowledge report*. In: International Conference on Amazon Land Use and Agricultural Research, CIAT. Cali, Colombia.
- CORMADERA. 2002. *Guías técnicas para Plantaciones Forestales en el Ecuador*. CORMADERA, Quito Ecuador, Gmelina arborea, pp. 85-111.
- Dinauer R. ed 1977 *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America. 666 p.
- Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M y Robledo C. (2008). *InfoStat, versión 2008*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
- Duke J.A. (1983). *Gmelina arborea Roxb. Handbook of Energy Crops*. Unpublished. Accessible at: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Gmelina_arborea.html.
- Evans J, Turnbull JW (2004). *Plantation forestry in the tropics*, 3rd edn. Oxford University Press, Oxford
- Francioso O, Sanchez.Cortez S, Bonora S, Roldan ML, Certini G (2011). *Structural characterization of charcoal size fractions from a burnt Pinus pinea forest by FT-IR, Raman and surface-enhanced Raman spectroscopies*. *J. Mol. Struct* 994(1-3):155-162
- Gaskin JW, Speir RA, Harris K, Das KC, Lee RD, Morris LA (2010). *Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield-Agron. J* 102:623-633
- Glaser B, Lehmann J, Zech W (2002 a). *Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review*. *Biology and Fertility of Soils*: 35:219-230
- Glaser B, Guiggenberger G, Zech W (2002 b). *Past anthropogenic influence on the present soil properties of anthropogenic dark earths (Terra Preta) in Amazonia (Brazil)*. *Geoarcheology*.
- Haefele MS, Konboon Y, Wongboon W, Amarante S, Maaiafat AA, Pfeifer ME, Knoblauch C (2011). *Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems*. *Field crops Res*. 121:430-440
- Hossain M. K (1999). *Gmelina arborea: a popular plantation species in the tropics*. Forest, Farm, and Community Tree Network. Fact sheet. September 1999. Accessible at: http://www.winrock.org/fnrm/factnet/factpub/FACTSH/Gmelina_arborea1.pdf.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE MINERIA (DGGM) (1996). *Mapa geológico del Ecuador*. Hojas de Paquisha y Zamora. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador.

- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL ECUADOR (INAMHI). *Series de datos de la Estación Meteorológica de Zamora 1970 – 1993*.
- Jensen, M. (1995). *Trees commonly cultivated in Southeast Asia*. Illustrated field guide. RAP Publication: 1995/38. FAO. Bangkok, Thailand. p. 93.
- Jones DL, Rousk J, Edwards-Jones G, Deluca TH, Murphy D. (2011). *Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year trial*. Soil Biology and Biochemistry 45: 113 - 124
- Keiluweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M. (2010). *Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar)*. Environ Sci Technol 44(4):1247-1253.
- Kimetu J, 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 11:726-739
- Konke T, Calvas B, Aguirre N, Román R, Günter S, Stimm B, Weber M, Mosandl R. (2009). *Can tropical farmers reconcile subsistence needs with forest conservation?*. Front Ecol Environ.
- Lehmann J, Silva J, Rondon M, Silva C, Greenwood J, Nehls T, Steiner C, Glaser B. (2002). *Slash-and-char- a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon*. In: Soil Science: Confronting New Realities in the 21st century. 7th World Congress of Soil Science, Bangkok.
- Lehmann J, Silva J, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. (2003). *Nutrient availability and leaching in an archeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments*. Plant and Soil 249: 343-357.
- Lehman J. (2007). *Bio-energy in the black*. Front. Ecol. Environ. 5:381-387.
- Lehmann J, Rillig M, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. (2011). *Biochar effects on soil biota – A review*. Soil Biol Biochem.
- Leopold, A.C. (2001). *Attempting restoration of wet tropical forests in Costa Rica*. Forest Ecology and Management. 142: 1–3, 243-249.
- Lotter D. (2002). *Tropical soil fertility, Terra Preta soils of the Amazon*. News and research. The new farm.
- Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehman J (2010). *Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol*. Plant Soil 333 (1-2):117-128
- Major J, Lehman J, Rondon M, Goodale C (2010). *Fate of soil applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration*. Global Change Biol 16:1366-1379
- Mgagwu J, Piccolo A (1997). *Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield*. In: Drozd J, Gonet SS, Senesi N, Weber J (eds) The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland, pp 921-925.
- Nocentini C, Certini G, Knicker H, Francioso O, Rumpel C (2010). *Nature and reactivity of charcoal produced and added to soil during wildfire are particle-size dependent*. Org Geochem 41(7):682-689
- Novak JM, Busscher WJ, Laird DL, Ahmenda M, Watts DW, Niandou MAS (2009). *Impact of biochar amendment*

- on fertility of a Southeastern coastal plain soil.* Soil Sci 174(2):105-112
- Novak JM, Bussher WJ (2011). *Selection and use of designer biochars to improve characteristics of Southern USA Coastal Plain degraded soils.* Advanced Biofuels and Byproducts. Springer Science. New York.
- Nwoboshi LC (2000). *The nutrient factor in sustainable forestry.* Ibadan University Press, Ibadan, Nigeria
- Onyekwelu JC, Biber P, Stimm B (2003) *Thinning scenarios for Gmelina arborea plantations in south-western Nigeria using density management diagrams.* Food Agric Environ 1:320–325
- Onyekwelu JC, Mosandl R, Stimm B (2006) *Productivity, site evaluation and state of nutrition of Gmelina arborea plantations in Oluwa and Omo forest reserves, Nigeria.* Forest Ecol. Manage. 229:214-227.
- Onyekwelu J, Stimm B, Evans J. (2011). *Plantation Forestry Review.* In: Günter, S., Weber, M., Stimm, B., Mosandl, R. (Eds.). *Silviculture in the tropics.* Springer: 399- 454.
- Orwa *et al.* (2009). *Schizolobium parahybum.* Agroforestry Database 4.0. Accessed July 2012. Accessible at: http://www.worldagroforestry.org/treedb/2/AFTPDFS/Schizolobium_parahybum.pdf
- Otsamo A, Adjers G, Hadi TS, Kuusipalo J, Tuomela K, Vuokko R (1995). *Effect of site preparation and initial fertilization on the establishment and growth of four plantation tree species used in reforestation of Imperata cylindrical (L.) Beauv dominated grass land.* Forest Ecol Manag 73:271–277.
- Rollenbeck R, Bendix J. (2011). *Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations.* Atmospheric Research 99: 277-289.
- Solaiman ZM, Blackwell P, About LK (2010). *Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonization, growth and nutrition of wheat.* Australian Journal of Soil Sciences 48:546-554.
- Soethe N, Lehmann J, Engels C. 2006. *The vertical pattern of rooting and nutrient uptake at different altitudes of a south Ecuadorian montane forest.* Plant Soil. DOI 10.1007/s11104-006-9044-0
- Spokas KA, CCantrll KB, Novak JM, Archer DW, Ippolito JA, Collins HP, Boateng AA, Lima IM, Lamb MC, McAloon AJ, Lentz RD, Nichols KA (2011). *Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration.* Journal of Environmental Quality: 973 - 989.
- Siddique I, Engel V, Parrota J, Lamb D, Nardoto G, Ometto J, Martinelli L, Schmidt S. (2008). *Dominance of legume trees alters nutrient relations in mixed species forest restoration plantings within seven years.* Biogeochemistry 88:89 - 101. DOI 10.1007/s10533-008-9196-5
- Sys C. (1979). *Regional Pedology- Tropical Soils.* Part II. International Training Centre for Post-graduate Soil Scientists. Lecture notes. State University of Ghent.
- UNITED STATES DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. (2010) *Keys to Soil Taxonomy.* Eleventh Edition. Natural Resource Conservation Service 338 p.
- Tropical Biology (2006). *Schizolobium parahybum.* Accessed July 2012. [http://www.tropical-biology.org/research/dip/species/Schizolobium parahybum.htm](http://www.tropical-biology.org/research/dip/species/Schizolobium_parahybum.htm).
- Valarezo C, Iñiguez M, Valarezo L, Guaya P. (1998). *Condiciones Físicas de los*

- Suelos de la Región Sur del Ecuador. Una guía para proyectos de riego, drenaje, manejo y conservación de suelos.* Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. 227 p.
- Valarezo C. (2004). *Características, distribución, clasificación y capacidad de uso de los suelos en la Región Amazónica Ecuatoriana (Universidad Nacional de Loja- Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios –PROMSA.* Editorial Universitaria, Loja.
- Valarezo C. (2008). *Proyecto “Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el sur de la Amazonía Ecuatoriana”.* Universidad Nacional de Loja – SENACYT, Loja, Ecuador. 20 p.
- Valarezo C, Maza H, Chamba C, Valarezo L, Merino B, Villamagua M, Mora M, González R. (2010). *Criterios en la instalación de los experimentos y caracterización de los sitios del proyecto "Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el Sur de la Amazonía Ecuatoriana"* CEDAMAZ – UNL 1(1):65 - 80
- World Agroforestry Centre (2000). *Gmelina arborea.* Agroforestry Tree Database: Accessed July 2012. Accessible at: <http://www.worldagroforestrycentre.org/sea/products/afdbases/af/asp/SpeciesInfo.asp?SpID=914>.
- Yamato M, Okimori Y, Wibowo IF, Anshori S, Ogawa M (2006). *Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia.* Soil Sci Plan Nutr 52:489-495
- Zwieten VL, Kimber S, Morris S, Chan YK, Downie A, Rust J, (2010). *Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility.* Plant Soil 327:235-246.