



Fertilidad del suelo granodiorita, fase inicial de plantación *gmelina arbórea* y *schizolobium parahybum*, con carbón vegetal en la amazonia ecuatoriana

Fertility of the granodiorite soil, initial phase of tree *gmelina* and *schizolobium parahybum* planting, with charcoal in the Ecuadorian Amazon

Fertilidade do solo granodiorito, fase inicial do plantio de gmelina arborea e schizolobium parahybum, com carvão vegetal na Amazônia equatoriana

Miguel Villamagua
miguelav63@yahoo.com

Carlos Valarezo
cvalarezo@gmail.com

Programa de Maestría en Nutrición Vegetal. Universidad Tecnológica Equinoccial Sede Santo Domingo-Ecuador

Artículo recibido enero 2019, arbitrado mayo 2019 y publicado en septiembre 2019

RESUMEN

En un suelo ácido (granodiorita) del ambiente de ladera del sur de la Amazonia Ecuatoriana se instaló un experimento en parcelas subdivididas (2x2x3) para determinar el efecto de biocarbón (0, 3, y 6 t ha⁻¹), cal (5 t ha⁻¹) y nutrientes (N; P, K; Mg y Zn), sobre el crecimiento inicial de pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) y melina (*Gmelina arborea* Roxb.), y la evolución de las condiciones físico-químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el almacenamiento de C. A los dos años se encontró diferencias estadísticas altamente significativas por la fertilización en: altura planta, diámetro basal y diámetro de altura al pecho. En la capa 00 - 25 cm de los tratamientos con fertilización se incrementaron los contenidos totales Ca, Mg, K, Zn. En la capa 25 - 50 cm de los tratamientos fertilizados se incrementaron las concentraciones de Mg y K. El pH_{H2O} en las dos capas en los fertilizados evolucionó de 4,8 a 5,2 y de 4,7 a 4,8, respectivamente; y la acidez cambiante disminuyó. Además, se incrementaron las concentraciones de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺; el K⁺ permaneció bajo. En la capa 00 - 25 cm de los fertilizados se incrementó la disponibilidad de P, Ca, Mg y Zn; el N, K y Cu permanecieron en el rango bajo. En los fertilizados se incrementó el C almacenado en la biomasa aérea y biomasa + capa 00- 50 cm en 17,4 y 25 t ha⁻¹, respectivamente.

Palabras clave: biocarbón, *Schizolobium parahybum*, *Gmelina arborea*, suelos degradados del trópico húmedo, amazonia ecuatoriana

ABSTRACT

In an acid steep slope soil (granodiorite) of the Sothern Ecuador Amazonia, a double split plot experiment was installed aiming to determine the effect of biochar (0, 3, y 6 t ha⁻¹), lime (5 t ha⁻¹) and nutrients (N; P, K; S, Mg y Zn) on the initial growth of pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) and melina (*Gmelina arborea* Roxb.), the evolution of the soil physico-chemical conditions and the storage of C. After two years high statistical differences were found for plant height, basal diameter and BHD. In the fertilized ones the total concentration of Ca, Mg, K and Zn increased in the 00 - 25 cm layer and Mg and K in the 25 - 50 cm layer; pH_{H2O} changed from 4,8 to 5,2 and 4,7 to 4,8, respectively, meanwhile the exchangeable acidity decreased. Ca⁺⁺ and Mg⁺⁺ increased while K⁺ remained low. The availability of P, Ca, Mg and Zn increased; N, K and Cu remained low. C storage increased in the aerial biomass as in aerial biomass + 00 - 50 layer, 17, 4 and 25 t/ha, respectively.

Key words: biocarbón; *Schizolobium parahybum*; *Gmelina arborea*; degraded soils in the humid tropics; Amazonia Ecuadorian

RESUMO

Em um solo ácido (granodiorito) do ambiente da encosta sul da Amazônia equatoriana, um experimento foi instalado em parcelas subdivididas (2x2x3) para determinar o efeito do biocarvão (0, 3 e 6 t ha⁻¹), cal (5 t ha⁻¹) e nutrientes (N; P, K; Mg e Zn), no crescimento inicial de pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) e melina (*Gmelina arborea* Roxb.), e na evolução das condições físico-químicas do Solo, disponibilidade de nutrientes e armazenamento de C. Dois anos depois, foram encontradas diferenças estatísticas altamente significativas devido à adubação em: altura da planta, diâmetro basal e diâmetro da altura do peito. Na camada de 00 - 25 cm dos tratamentos com adubação, os teores totais de Ca, Mg, K, Zn foram aumentados. As concentrações de Mg e K foram aumentadas na camada de 25-50 cm dos tratamentos fertilizados. O pH_{H2O} nas duas camadas nos fertilizados evoluiu de 4,8 para 5,2 e 4,7 para 4,8, respectivamente; e a acidez variável diminuiu. Além disso, as concentrações de Ca ++ e Mg ++ foram aumentadas; o K + permaneceu baixo. Na camada de 00 a 25 cm de adubação, aumentou a disponibilidade de P, Ca, Mg e Zn; N, K e Cu permaneceram na faixa baixa. Nos fertilizados, o C armazenado na biomassa aérea e na biomassa + camada 00- 50 cm aumentou em 17,4 e 25 t ha⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: biochar; *Schizolobium parahybum*; *Gmelina arborea*; solos degradados dos trópicos úmidos; Amazônia equatoriana

INTRODUCCIÓN

En el ambiente de ladera del corredor de la red fluvial Zamora-Nangaritza, en la zona sur de la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE), en el rango de 800 a 1100 msnm, los suelos son fuertemente ácidos; sin embargo, en condiciones naturales soportan un bosque tropical biodiverso y multi-estrato, cuya reserva de nutrientes se concentra en la biomasa y en la capa orgánica (Valarezo, 2004). La intervención de los colonos sobre este ecosistema ha consistido en la extracción de las especies arbóreas de valor comercial, luego la tumba, roza y quema de los árboles remanentes, seguida del cultivo de naranjilla y 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 materia orgánica, y se

instala un proceso de erosión laminar hídrica, por lo que en un tiempo corto se degrada la fertilidad del suelo y las tierras se convierten en marginales, que se caracterizan por una muy fuerte acidez y baja disponibilidad de N, P, K, Mg, Zn y B. Se estima que actualmente la afectación alcanza el 50% de las áreas del pie de monte y las colinas y montañas bajas (50 000 ha), la misma que sigue creciendo a expensas de la destrucción del bosque primario (Valarezo, y otros 1998).

Por otro lado, la zona tiene gran potencial para la producción de biomasa, dadas las condiciones de luminosidad, humedad suficiente y elevada temperatura; por lo que, la recuperación sostenida de la fertilidad de los suelos degradados del ambiente de ladera es condicionante fundamental para la producción de especies maderables de valor comercial, como alternativa para la ganadería degradante. Ello demanda controlar la fuerte acidez, reponer los nutrientes deficientes acompañados de un medio que permita su retención para que éstos no se lixivien ni se cristalicen como compuestos insolubles. El carbón vegetal, es uno de los materiales que cumple los requisitos indicados, por lo que cuando se lo aplica al suelo se lo denomina biocarbón.

Por otro lado, el incremento del CO₂ en la atmósfera, viene provocando el efecto invernadero, lo que se traduce en un aumento de la temperatura mundial promedio, denominado *Cambio Climático Antropogénico*. Entre las fuentes principales de emisión de este gas se mencionan la quema de combustibles fósiles en los países desarrollados; así como, la deforestación y el cambio de uso de la tierra para ganadería o agricultura en los países tropicales (International Panel Climate Change, 2007).

Investigaciones en suelos antropogénicos de la Amazonía, denominados suelos de Terra Preta (Glaser, y otros 2002), han demostrado

que el biocarbón puede mantener altos niveles de materia orgánica y de nutrientes aprovechables para las plantas. Se reporta que en los suelos ácidos, la aplicación de biocarbón incrementa el pH y disminuye la saturación de Al, factores que constituyen las principales limitaciones de la productividad de los cultivos en los suelos altamente meteorizados de los trópicos húmedos (Cochrane, y Sánchez, 1980; Mgagwu, y Piccolo, 1997); pero, no solamente incrementan el contenido de nutrientes, sino también la retención de éstos, lo cual es importante en los suelos que tienen baja capacidad de retención iónica (Glaser, y otros 2002).

El biocarbón ha sido utilizado para el mejoramiento de los suelos (Berkowitz y otros 1970; Cochrane, y Sánchez, 1980; Mgagwu, y Piccolo, 1997); en Alfisoles y Ultisoles de Zambia, reporta, entre siete plantas nativas maderables que en los suelos con carbón vegetal se obtuvo mejor germinación de las semillas (incremento de 30%), mayor altura de brotes (24%) y mayor producción de biomasa. Otro autor (Kishimoto y Sugiura, 1985), después de cinco años de la aplicación de 0,5 t/ha de biocarbón, encontraron incrementos en la altura de los árboles de *Cryptomeria japonica* en 1,26 a 1,35; así como, un aumento en la biomasa en 2,31 a 2,36 veces. El rendimiento de los cultivos se puede incrementar aún más, cuando la aplicación de biocarbón se agrega fertilizantes y abonos orgánicos (Chidumayo, 1994 y Glaser, y otros 2002).

En los suelos Terra Preta del Brasil, la lixiviación y la cristalización de los nutrientes es retardada por la fuerte formación de quelatos, que son complejos de ácidos húmicos con iones metálicos (Kishimoto, y Sugiura, 1985)], lo cual se ha observado también en los suelos que se les ha aplicado biocarbón (Glaser y otros 2002). Se asume

que la lenta oxidación (biótica y/o abiótica), en los bordes de la cadena aromática del biocarbón, que contiene grupos carboxílicos, es la responsable tanto de la posible formación de complejos órgano-minerales, como del incremento de la capacidad de intercambio catiónico (Glaser y otros 2002).

Adicionalmente, el carbón (C) pirogénico es muy resistente a la degradación microbiana, persistiendo en el medio ambiente a través de siglos, debido a la estabilidad química proveniente de su estructura aromática (Lehmann, y otros, 2002, Bechtold, 2002 y Goldberg, E. 1985). Por lo tanto, el aporte de biocarbón para mejorar la fertilidad, podría conducir a un mayor secuestro de C y constituirse en un sumidero de CO₂ de largo plazo (Glaser, 2002).

La deforestación y otros cambios en el uso del suelo, constituyen una fuente significativa de CO₂ atmosférico. La magnitud de esta fuente es estimada entre 8 y 47% de la que produce los combustibles fósiles (Brown, 1997 y Alexander, y Otros 1998). La deforestación contribuye al aumento del CO₂ en la atmósfera de dos formas: disminuyendo la cobertura vegetal capaz de fijar C atmosférico, y por la liberación de CO₂ a la atmósfera a través de la quema y descomposición de la biomasa, incluida parte de la materia orgánica del suelo (Hall y otros 1994).

En el contexto expuesto, un equipo de investigadores de la Universidad Nacional de Loja implementaron el proyecto de investigación de largo plazo (seis años), denominado: "Gestión de la fertilidad del suelo con enmiendas de carbón vegetal en plantaciones de árboles maderables en el sur de la Amazonia Ecuatoriana", cuyo propósito se orienta a generar alternativas para la repoblación forestal productiva de las áreas degradadas en el marco de una gestión,

sostenida de la fertilidad de los suelos.

Una parte de la primera fase del referido proyecto corresponde a la presente investigación, en el marco de los siguientes objetivos específicos: 1) Determinar el efecto de las enmiendas de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales, sobre el crecimiento en su etapa inicial de las especies arbóreas maderables (*Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*), en un suelo seleccionado del cantón Zamora de la zona sur de la región amazónica ecuatoriana. 2) Evaluar la incidencia de la aplicación de carbón vegetal, cal y nutrientes minerales sobre las condiciones físico-químicas del suelo, la disponibilidad de nutrientes y las reservas C y de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn y Zn, en el suelo y 3) Evaluar el almacenamiento de carbono en la fase inicial de la plantación de árboles maderables con enmiendas de carbón vegetal.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio y el sitio experimental estuvo ubicado en el sector La Victoria del cantón Zamora, a cinco kilómetros de la ciudad de Zamora vía a Yanzatza, entre las coordenadas 9 552 541E y 07 30492 N; y en una altitud de 957 msnm, Ecuador. La forma del terreno es una ladera moderadamente

escarpada, con 15% de pendiente. El material parental del suelo es el gran Batolito de Zamora, compuesto de leuco granodioritas y granodioritas hornbléndicas (DGGM, 1989).

Según los registros del INAMHI (1970 y 1993) la zona tiene una temperatura media mensual 22°C; precipitación media anual de 1945 mm, con un rango de 1865 mm a 2314 mm; y, la humedad relativa media mensual es de 88% (Valarezo, y otros, 2010).

Plántulas de *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahybum*; carbón vegetal elaborado de los siguientes árboles: 80% tábano (*Casearia sp.* familia Flacourtiaceae) y 20% de la mezcla de cashco (*Weinmania fagaroides*), canelo (*Nectandra laurel* Nees) y capulí (*Prunus opaca* (Benth.)Walp.), molido en partículas menores a 0,5 cm; cal agrícola (CaCO_3); y fertilizantes (urea, superfosfato triple, sulpomag y sulfato de zinc).

Para el diseño experimental, factores en estudio, niveles y tratamientos se evaluaron tres factores: dos especies arbóreas (melina y pachaco); dos niveles de la combinación de cal y fertilización (sin y con); y tres niveles de carbón vegetal (0, 3 y 6 t ha⁻¹), según se presenta en la tabla 1. El diseño experimental fue en parcelas subdivididas (2x2x3), en bloques al azar, con doce tratamientos y cuatro repeticiones.

Tabla 1. Factores y niveles del experimento

Factores	Niveles
Especies arbóreas (A)	a1. pachaco, <i>Schizolobium parahybum</i> a2. melina, <i>Gmelina arborea</i>
Carbón vegetal (C)	c1. 0 t carbón vegetal/ha c2. 3,0 t carbón vegetal/ha c3. 6,0 t carbón vegetal/ha
Cal y fertilización (F)	f1. 0 t cal / ha + 0 kg de nutrientes / ha F2. 5 t cal ha ⁻¹ , N (200 kg ha ⁻¹), P (150 kg ha ⁻¹), K (200 kg ha ⁻¹), Mg (118 kg ha ⁻¹), Zn (40 kg ha ⁻¹).

Evaluación de las condiciones físicas, químicas y la fertilidad actual y

potencial del suelo

En cada bloque del experimento, se preparó una calicata de 1,2 m de profundidad, en la que se describió el perfil del suelo (FAO, 1975), y se realizó la clasificación taxonómica según las claves del USDA Soil Taxonomy (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2010).

De cada horizonte del perfil del suelo se tomaron muestras en las cuales se determinaron los contenidos totales de Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn, Cu, Si y Mo (mediante digestión con HCl y HNO₃ y lectura en absorción atómica); las cantidades disponibles de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, (extracción con la solución de Olsen Modificada: NaHCO₃ + EDTA, a pH 8,5). El N y P extraídos se determinaron mediante espectrofotometría UV - visible y todos los demás elementos por absorción atómica. La textura se utilizó como dispersante NaOH + oxalato de sodio. La CIC con acetato de amonio 1 N pH 7,0 y generación de OH⁻ con formaldehído. Las bases cambiables por absorción atómica. El pH_{H2O} y pH_{KCl} (método potenciómetro), y la acidez cambiante (Al⁺³ + H⁺) mediante titulación con NaOH 0,01 N, en extractos con KCl 1 N.

Plantación de las especies maderables y aplicación de enmiendas

En el sitio de plantación de cada árbol se trazó una circunferencia de 2,4 m de diámetro; y, según el correspondiente tratamiento se distribuyó e incorporó uniformemente la cal, los fertilizantes y el carbón vegetal, hasta una profundidad de 25 cm. La dosis de carbonato de calcio (5 t ha⁻¹) se estableció a partir de los promedios ponderados del contenido de Al³⁺ intercambiable y de materia orgánica (método de Wakley Black), de las muestras tomadas de la capas superiores del suelo hasta 25 cm de profundidad, aplicando la

relación: 2 cmol(+) kg⁻¹ de Ca²⁺ por cada 1 cmol(+) kg⁻¹ de Al³⁺ (Sys, 1979).

Para evaluar el crecimiento de los árboles y la producción de biomasa, a los 190, 250, 300, 400, 540 y 720 días desde la plantación se midieron: a) Altura de planta, b) Diámetro basal del tallo, y c) Diámetro a la altura del pecho (DAP). El DAP se midió únicamente a los 720 días.

El volumen de los árboles se calculó con las mediciones registradas a los 720 días, utilizando la siguiente fórmula: $V = \frac{\pi}{4} DB^2 hf$

V= Volumen del árbol (m³);
 constante 3,1416; DB= Diámetro basal en (m)
 hf = Altura de fuste (m); f = factor de forma: es la relación entre el diámetro basal (m) y diámetro altura de fuste (m) de cada especie.

Monitoreo de la evolución de las condiciones químicas y de fertilidad del suelo

Al inicio, seis y 18 meses después de la plantación de las especies arbóreas se tomaron muestras de suelo en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, únicamente del área tratada de las cuatro plantas seleccionadas de la unidad experimental. Las mismas fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de Loja, para monitorear las cantidades disponibles de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn y la evolución del pH_{H2O}, acidez cambiante (H⁺ y Al⁺⁺⁺), CIC y bases cambiables, por efecto de los tratamientos aplicados. Los contenidos totales se analizaron únicamente de las sub-subparcelas del bloque 1, considerado como representativo, en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Berna - Suiza.

Evaluación del carbono en el suelo y la biomasa

En las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm, en las muestras tomadas al inicio, seis y 18 meses después de la fertilización y plantación se determinó el contenido de C (método de digestión húmeda de Walkley - Black). El carbono del suelo se cuantificó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Carbono del suelo (t ha}^{-1}\text{)} = \% \text{ CO} \times \text{Da} \times \text{P} \times 100$$

CO = carbono orgánico (%); P = profundidad de muestreo (m); Da = densidad aparente (t m⁻³).

Para la determinación de la biomasa de la copa se eligió un árbol de melina y pachaco por cada tratamiento en los bloques I y IV. En cada árbol se realizó la poda y peso de las ramas y hojas. Se registró la altura y el diámetro de copa, con estos valores se generaron las ecuaciones alométricas respectivas. Seguidamente se tomó 1 kg de biomasa de cada tratamiento, se secó a 60°C hasta peso constante. El factor entre peso seco/peso húmedo, permitió transformar la biomasa húmeda a seca. Luego, se tomó 1g de biomasa molida para el análisis del contenido de C mediante pirolisis en el Elemental Analyser (Perkin Elmer). A partir de la densidad aparente en húmedo se calculó el

peso de fuste húmedo y por el factor de humedad, se determinó el peso seco. La biomasa aérea es el resultado de la biomasa de copa + biomasa de fuste.

La cantidad total de carbono almacenado (t ha⁻¹) corresponde al C en la biomasa aérea y en las capas 00 - 25 cm y 25 - 50 cm de suelo.

Los datos de las variables de altura total, DB, DAP, contenidos totales (Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe, Zn, Cu, Si y Mo) y la evolución de las condiciones químicas, fertilidad y disponibilidad de nutrientes y la cantidad de carbono orgánico almacenado en el suelo, fueron promediados para el correspondiente análisis de la variancia (ADEVA) y la prueba de Tukey para las variables estadísticamente significativas, para lo cual se utilizó el software InfoStat (Di Rienzo, y otros, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento de las especies arbóreas

En todas las fechas de evaluación (190, 250, 300, 400, 540 y 720 días) se evidenció diferencias estadísticas altamente significativas en la variable altura de planta para el factor fertilización (cal + nutrientes), cuya evolución se ilustran en las Figuras 1 y 2.

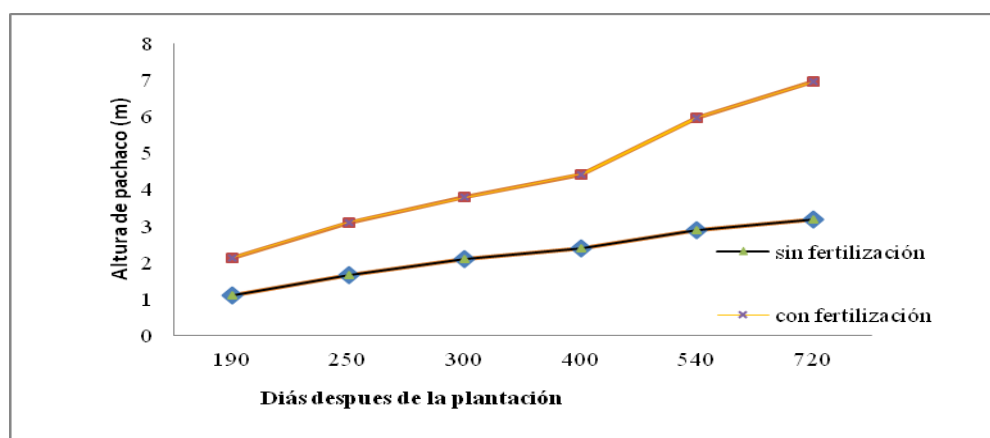


Figura 1. Evolución de la altura del pachaco sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.

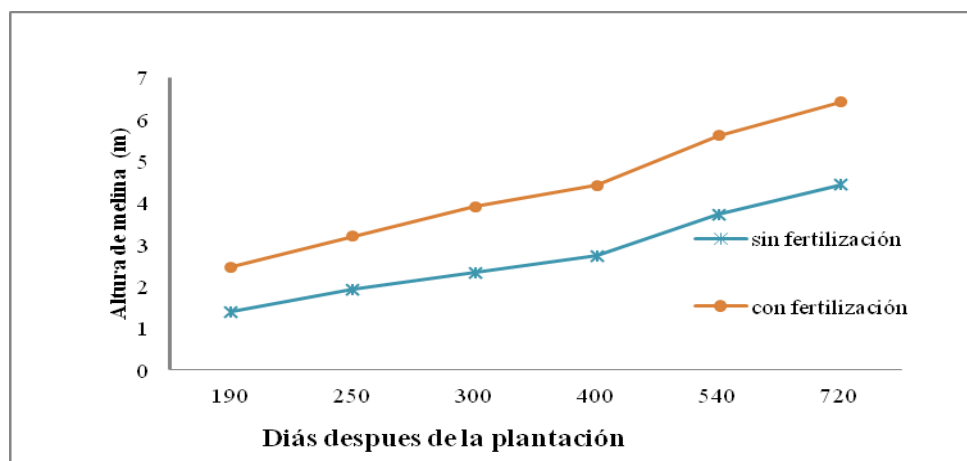


Figura 2. Evolución de la altura de la melina sin y con fertilización (aplicación de N, P, K, Mg, S, Zn + cal) hasta los 720 días después de la plantación.

El crecimiento de la melina que fue de $0,9 \text{ cm día}^{-1}$ durante los primeros 720 días, es similar a los promedios reportados en Colombia (Urrego, 2004), los cuales se ubican en el rango de $0,7$ a $1,23 \text{ cm día}^{-1}$ en suelos de textura arcillosa con mal y buen drenaje, respectivamente. Por su parte otro autor (Otsamo, 2002), en Indonesia con $1111 \text{ plantas ha}^{-1}$ logró un crecimiento de 1 cm día^{-1} a los dos años.

También para las variables diámetro basal (DB) se obtuvieron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización en todas las fechas de registro. A los 720 días el DB en el pachaco fue de 7 y 13 cm y en la melina de 11 y 16 cm , en los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

De igual forma, en el DAP a los dos años desde la plantación se detectaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización, con valores promedio de 6 y $11,1 \text{ cm}$ en los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente. El valor de $11,1 \text{ cm}$ coincide con los resultados de

Otsamo (Otsamo, 2002) en Indonesia.

En el volumen de los árboles detectaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización, con valores promedio de $21,5 \text{ m}^3$ y 79 m^3 en los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente. Cabe indicar que la melina alcanzó una productividad de $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cual es cercana a $37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ obtenido en Colombia (Urrego, 2004).

Las diferencias de la altura de planta, DB y DAP por efecto de la fertilización, en las dos especies, se atribuye al efecto combinado de los nutrientes aplicados (N, P, K, Ca, Mg, S, Zn) y de la hidrólisis del ion carbonato de la cal (CO_3^{2-}) que genera iones OH^- , elevando el pH y facilitando la absorción de los nutrientes, especialmente del fósforo (Valarezo, 2004).

Es pertinente mencionar que hasta los 720 días de registro de las tres variables de crecimiento de los árboles (altura, DB y DAP) no se detectaron diferencias estadísticas significativas por efecto del biocarbón (3 y 6 t ha^{-1}).

Características y evolución de las condiciones químicas y de fertilidad hasta los 18 meses

Contenidos totales en la capa de 00 - 25 cm antes de la instalación del experimento

Los valores de los contenidos total promedio de Ca, Mg, Na, K y Mn fueron 339, 301, 148, 355 y 54 mg kg⁻¹, respectivamente, los cuales son menores en 1,5, 2,5, 9 y 8,4 veces, en su orden, a los promedio de 29 suelos Cambisoles del bosque húmedo montano (cercano al área del proyecto) de la Estación Científica San Francisco (ECSF) ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera Real de Los Andes, que conforma la vertiente superior de la cuenca Amazónica, desarrollados sobre filitas, cuarcitas y metaareniscas del paleozoico; y, en 10, 12, 1,8, 3 y 8,4 veces mayores, respectivamente, que el promedio para los tres Ferrasoles extremadamente meteorizados del Cerrado - Brasil (Wedephol, 1995).

Los contenidos totales promedios de Fe y Zn fueron 13 385 y 8 mg kg⁻¹, respectivamente, los cuales son menores en 1,3, 1,5 y 14,6, al promedio de los 29 Cambisoles de la ECSF; y, 1,3 veces menores que el promedio de los suelos del Cerrado - Brasil (Wedephol, 1995).

Evolución de los contenidos totales de los elementos

Los contenidos totales de Ca, Mg, K y Zn en la capa 00- 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementaron en 489, 141, 938 y 30 mg kg⁻¹ en su orden, en relación al inicio del ensayo; en cambio, en los tratamientos sin fertilización, los valores fueron de 142, 87, 555 y 6 mg kg⁻¹ en su orden. El aumento del Ca, Mg, K y Zn se explica por la adición de 5 t ha⁻¹ de CaCO₃, 118

kg ha⁻¹ Mg, 200 kg ha⁻¹ K y 40 kg ha⁻¹ de Zn. En la capa 25-50 cm los contenidos de Ca, Mg y K se incrementaron en 109, 106 y 727 mg kg⁻¹ respectivamente, en los tratamientos con fertilización más biocarbón con respecto al testigo, lo que indica que existió cierta movilización del Ca, Mg y K desde la capa superior, posiblemente a que no fueron completamente retenidos por el biocarbón, excepto el Zn que disminuyó.

Los contenidos totales de Na, Fe y Mn en la capa 00 - 25 cm, en los tratamientos con fertilización (no incluyó la aplicación de estos elementos), disminuyeron en 45, 3 286 y 9 mg kg⁻¹, respectivamente, en relación al inicio; en cambio, en aquellos sin fertilización, los valores fueron 7, 2938 y 3 mg kg⁻¹, en su orden. En la capa 25 - 50 cm, los valores disminuyeron en 7, 1148 y 3 mg kg⁻¹, en relación a los testigos. La disminución de los contenidos totales de Na, Fe y Mn en los tratamientos sin y con fertilización se podría atribuir a la toma de este elemento por las especies arbóreas.

El contenido total de Mo únicamente se detectó al inicio del experimento en el rango de 6 a 17 mg kg⁻¹; en cambio, a los 18 meses en las dos capas los valores se encuentran por debajo del límite inferior de detección de la técnica de análisis empleada.

Evolución de las condiciones químicas del suelo hasta 50 cm de profundidad

El pH_{H2O} se incrementó y la acidez cambiante disminuyó significativamente en los tratamientos con fertilización (que recibieron 5 t ha⁻¹ de cal), en comparación con aquellos sin fertilización, en las dos capas. En la capa de 00 - 25 cm el pH_{H2O} evolucionó de 4,8 a 5,2 y la acidez de 3,4 a 1,2 cmol (+) kg⁻¹; mientras que, en la capa de 25-50 cm los valores se ubicaron entre 4,7 a 4,8 y 3,6 a 3 cmol (+) kg⁻¹, en su orden. Tanto el incremento del pH_{H2O} y la disminución de la

acidez cambiante se atribuyen al efecto neutralizante de la cal.

En las dos capas, la CICE, Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ en los tratamientos con fertilización, aumentaron significativamente en comparación con aquellos sin fertilización. Aunque predominan en el suelo arcillas de baja actividad (caolinita), el incremento de la CICE, se atribuye al aumento de las cargas eléctricas negativas dependientes del pH por efecto del encalado; en tanto que, el incremento del Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ se atribuye a la aplicación de la cal y del Mg, en la primera capa. En la capa de 25 - 50 cm se detectó un ligero incremento de estos cationes, aunque permanecieron en el rango bajo, por lo que se asume que se ha producido cierta movilización desde la capa superior.

Los valores del K⁺ y Na⁺ cambiante en las dos capas (00 - 25 cm y 25 - 50 cm), no presentaron significancias estadísticas. Los valores del K⁺ y Na⁺ en los tratamientos sin y con fertilización, al inicio y a los 18 meses en las dos capas, se ubicaron en el rango bajo de 0,10 a 0,22 cmol (+) kg⁻¹ y 0,27 a 0,29 cmol (+) kg⁻¹. Se asume que a el K⁺ ha sido tomado por las especies arbóreas en estudio.

Los valores del % SB en las dos capas para los tratamientos con fertilización se incrementaron significativamente, en relación a sin fertilización (de 45 a 85%), atribuida la

aplicación de Ca, Mg, K y Zn. En la capa 25 - 50 cm el % SB manifestó un ligero incremento ubicándose en el rango de 35 - 56%.

En el N disponible se detectó diferencias estadísticas altamente significativas para el factor fertilización únicamente en la capa 00 - 25 cm, los valores promedio fueron de 7,9 y 9,0 mg kg⁻¹ para los tratamientos sin y con fertilización, respectivamente.

El P disponible en la capa 00 - 25 cm en los tratamientos con fertilización se incrementó significativamente en comparación con aquellos no fertilizados (23 y 4 mg kg⁻¹, respectivamente). La mayor disponibilidad del P estaría asociada a la neutralización del Al³⁺ por efecto del encalado.

No se evidenció diferencia estadística significativa para el K disponible para ningún factor, en las capas 00- 25 cm y 25-50 cm, los valores se ubican en el rango bajo 43 - 39 mg kg⁻¹ y 23 a 30 mg kg⁻¹, respectivamente

En los tratamientos con fertilización los contenidos de Ca, Mg y Zn disponible en las dos capas se incrementaron significativamente en relación a aquellos sin fertilización (Tabla 2); lo cual se atribuye, para la primera capa, al encalado y la fertilización, y para la segunda capa, a cierta movilización desde la capa superior.

Tabla 2. Promedios y prueba de Tukey al 5% para el contenido de Ca, Mg y Zn disponible (mg kg⁻¹), en las capas, al inicio y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Ca		Mg		Zn	
		SF	CF	SF	CF	SF	CF
00 - 25	0	95	99	24	25	0,6	0,6
	18	253 b	590 a	174 b	368 a	0,9 b	10,3 a
25 - 50	18	229 b	339 a	97 b	169 a	0,6 b	3,7 a

SF= Sin fertilización; CF= Con fertilización

Medias con diferente letra dentro de la misma fila son estadísticamente diferentes y ninguna letra cuando no hay significancia estadística al 5% ($p < 0,05$).

Los contenidos de Cu disponible se mantuvieron en el rango bajo para todos los tratamientos ($< 1 \text{ mg kg}^{-1}$) y no se detectaron diferencias estadísticas, para ningún factor en las dos capas.

Los contenidos de Fe y Mn disponible, en los tratamientos con fertilización, disminuyeron significativamente, en comparación a aquellos sin fertilización (Tabla 3); sin embargo, los valores se mantuvieron en el rango alto como consecuencia de una acumulación residual de estos elementos en los suelos del trópico húmedo (Valarezo, 2004).

Tabla 3. Promedios y prueba de Tukey al 5% para los contenidos de Fe y Mn disponible (mg kg^{-1}), en las capas, al inicio y 18 meses después de la fertilización.

Capas (cm)	Meses	Fe		Mn	
		SF	CF	SF	CF
00 - 25	0	380	365	31	35
	18	282 b	217 a	33 b	24 a
25 - 50	18	235	219	20	19

SF= Sin fertilización; CF= Con fertilización

Medias con diferente letra dentro de la misma fila son estadísticamente diferentes y ninguna letra cuando no hay significancia estadística al 5% ($p < 0,05$).

La reducción de los contenidos disponibles de N, K, Cu, Fe y Mn con el tiempo se atribuye a la absorción de estos elementos por las especies arbóreas.

Captura de carbón por las especies arbóreas maderables y aporte al suelo

Biomasa y contenido de carbono en las especies arbóreas

La biomasa aérea se incrementó significativamente para los tratamientos sin y con fertilización, de 13,7 a 46,3 t ha^{-1} , respectivamente; concomitantemente aumentó el C almacenado en la biomasa (7 a 24,4 t ha^{-1}); sin embargo, para estos parámetros no se evidencian aún los efectos de la aplicación de 3 y 6 t ha^{-1} del biocarbón, frente al testigo.

Carbón en el suelo

No existió diferencia estadística significativa para el contenido de C a los 18 meses en la capa 00 - 25 cm. Al respecto, otros autores (Campbell, y otros, 2005), señalan que los cambios anuales del contenido de C son muy pequeños en relación a aquel existente; y, que, su variabilidad espacial puede ser muy grande.

En la capa 25 - 50 cm, en los tratamientos sin y con fertilización el contenido de C se incrementó significativamente de 79,6 a 86 t ha^{-1} , respectivamente; sin embargo se considera prematuro afirmar que estas diferencias reflejen la realidad de los procesos por acción de las especies arbóreas y la fertilización.

Almacenamiento de C en la biomasa y en el suelo

En los tratamientos con fertilización el contenido total de C en el sistema (hasta 50 cm en el suelo + biomasa aérea) se

incrementó significativamente en relación a los tratamientos sin fertilización (213,6 y 188,5 t ha⁻¹, respectivamente), con una diferencia de 25,1 t ha⁻¹, la cual se atribuye al efecto de la aplicación de los nutrientes deficientes y de la disminución de la acidez sobre el desarrollo de la biomasa aérea. Al respecto otros autores (Swamy, y Puri, 2005), reportan un incremento de C en el suelo + árbol de 19,5 t ha⁻¹ en plantaciones de melina durante 5 años en la India. En todo caso, el suelo constituye el gran reservorio de C en el sistema estudiado (rango de 89 % a 96 %), lo cual coincide con la afirmación de (Anikwe, 2010), quien indica que el suelo es el gran reservorio activo del C con el doble que en la atmósfera.

CONCLUSIONES

La fertilización (aplicación de cal y N, P, K, Ca, Mg, S y Zn) generó un efecto estadísticamente significativo sobre la altura total, diámetro basal y diámetro a la altura del pecho (DAP) del pachaco y la melina en su primera fase de crecimiento (24 meses).

Los contenidos totales de Ca, Mg Na, K, Mn, Al, Fe, Zn, Si y Mo en la capa 00 - 25 cm, fueron menores al promedio de los suelos Cambisoles de la Estación Científica San Francisco, próxima al sitio del experimento; en tanto que, aquellos del Ca, Mg, K y Na fueron mayores al promedio de los suelos altamente meteorizados de Cerrado- Brasil.

La fertilización incrementó de los contenidos totales de Ca, Mg, K, y Zn, en la capa 00- 25 cm; mientras que en la capa 25 - 50 cm se detectaron ligeros incrementos de Ca, Mg y K atribuidos a una movilización desde la capa superior.

La aplicación de carbón vegetal o biocarbón (3 y 6 t ha⁻¹) no evidenció efectos significativos y consistentes sobre el crecimiento de las dos.

La fertilización incrementó el pH_{H2O} en la capa de 00 - 25 cm a los 18 meses desde muy fuertemente ácido a fuertemente ácido; y, disminuyó la acidez cambiante (Al³⁺ + H⁺) desde el rango alto al medio.

La fertilización en la capa 00 - 25 cm incrementó significativamente la CICE pasando del rango bajo al medio, el porcentaje de saturación de bases evolucionó del rango medio a muy alto; además, se incrementaron las concentraciones de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺.

La fertilización en la capa de 00 - 25 cm, incrementó los contenidos disponibles de P, Ca, Mg y Zn. El N se mantuvo en el rango bajo. En la capa 25 - 50 cm se incrementaron las concentraciones de Ca, Mg y Zn, lo que se atribuye a una movilización desde la capa superior.

La fertilización incrementó significativamente la biomasa aérea, con una captura de C de 25 t ha⁻¹.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional de Loja por las facilidades brindadas y a la SENESCYT por el financiamiento del proyecto mayor, lo que permitió afrontar los gastos del estudio, al Ing. Edison Silva Ph.D e Ing. Mario Añasco, docentes de la UTE, por su contribución en la revisión del documento, a la Ing. Esthela González por los análisis de laboratorio.

REFERENCIAS

- Alexander, S., Schneider, S., Lagerquist K. (1998). *Nature's Services: societal dependence on natural ecosystems* (Washington, D.C: Gretchen C. Dally), "The interaction of climate and life", 476 p
- Anikwe, M. (2010). Carbon storage in soils of Southeastern Nigeria under different management practices. *Carbon Balance and Management* 5:5

- Bechtold, G. (2002). *Anthrohumox in Brazilian lowland*. Summary of Thesis. Consultado en agosto 2010. Disponible en http://www.geocities.com/gbechtold/gbt_p1.html. Goldberg, E. 1985. *Black carbon in the environment*. Wiley, New York
- Berkowitz, N., Chakrabarty, S., Cook, F., y Fujikawa, J. (1970). On the agrobiological activity of oxidatively ammoniated coal. *Soil Sci.* 110:211-217
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In Congreso Forestal Mundial (11, Antalya, Turquía), Actas. Antalya, Turquía, Ministry of Forestry. Pp.107-128
- Campbell, C., Janzen H., Paustian, K., Gregorich, E., Sherrod, L; Liang BC. y Zentner R. (2005). Carbon Storage in Soils of the North American Great Plains: Effect of Cropping Frequency. *Agron J.* 97:349-363
- Chidumayo, E. (1994). Effects of wood carbonization on soil an initial development of seedlings in miombo woodland, Zambia. *For Ecol Manage* 70:353-357
- Cochrane, T., Sánchez, 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
- 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
- FAO. (1975). "Guía y Claves para la Descripción de Perfiles de Suelos"
- Glaser, B., Guiggenberger, G., y Zech, W. (2002a). Past anthropogenic influence on the present soil properties of anthropogenic dark earths (Terra Preta) in Amazonia (Brazil). *Geoarcheology*
- Glaser, B., Lehmann, J., y Zech, W. (2002b). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*: 35:219-230
- Hall y Rao Hall, D.O., y Rao, K.K. (1994). *Photosynthesis*. 5th ed (Cambridge, Cambridge University Press)
- INSTITUTO ECUATORIANO DE MINERIA (DGGM) (1989). *Mapa geológico del Ecuador. Hojas de Paquisha y Zamora*. Instituto Geográfico Militar. Quito, Ecuador
- International Panel Climate Change (IPCC) (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>. (Consultado agosto 2012)
- Kishimoto, S., y Sugiura, G. (1985). Charcoal as a soil conditioner. *Int Achieve Future* 5:12-23
- Lehmann, J., Silva, J., Rondon, M., Silva, C., Greenwood, J., Nehls, T. Steiner, C., y Claser, 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
- 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 ĩ, 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
- Otsamo, A. (2002). Early effects of four fast-growing tree species and their planting density on ground vegetation in Imperata grasslands. *New Forests* 23: 1–17
- Swamy, S., y Puri S. (2005). Biomass production and C- sequestration of Gmelina arborea in plantation and agroforestry system in India. *Agroforestry Systems* 64: 181-195
- Sys, C. (1979). Regional Pedology. *Tropical Soils II*. Lecture notes. State University of Ghent, Belgium
- Valarezo, C. (2004a). *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. (2004b). *Gestión de la fertilidad del suelo en el trópico húmedo, en la región Amazónica ecuatoriana y bajo sistemas agroforestales*. Universidad Nacional de Loja- Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios –PROMSA. Editorial Universitaria, Loja
- 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 amazonia ecuatoriana”. *Revista CEDAMAZ 1(01)*. pp. 65 – 80
- Valarezo, C; Iñiguez, M; Valarezo, L; y 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)
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. Natural Resource Conservation Service 338 p
- Urrego, J. 2004. Growth potential of Gmelina arborea at 3 years of age in Colombia *New Forest 28*: 269–276, 2004
- Wedephol, H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. (59) 7. pp. 1217 – 1232