



Estimación de biomasa subterránea y carbono en los sistemas de producción; orgánica y monocultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona de Alto Beni, Bolivia.

Estimation of underground biomass and carbon in production systems; organic and monoculture of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the area of Alto Beni, Bolivia.

Fanny Eulalia Suño Hinojosa y David Cruz Choque.

RESUMEN:

Los Sistemas de producción desempeñan una importante función dentro de los ecosistemas ya que son generadores de servicios ambientales, el ecoturismo y la recreación. Se busca realizar una estimación del contenido de carbono almacenado en biomasa subterránea, en los sistemas de producción orgánica y Monocultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona de Alto Beni, de la cuarta sección municipal de la provincia Sud Yungas, Alto Beni está dividido en siete áreas de colonización que forman cinco grupos: I-III, II, IV, V-VI, VII. Se tomaron muestras en diferentes sistemas de producción de cacao: en monocultivo, Sistema Agroforestal Simple y Sistema Agroforestal Sucesional, datos de biomasa subterránea, diversidad de árboles y el suelo en 9 parcelas de 48*48 m. El contenido de biomasa subterránea se realizó mediante el muestreo de cilindros para las raíces finas y el uso de ecuaciones alométricas para las raíces gruesas, se observó que en el caso del Sistema Agroforestal Simple se tiene un almacenamiento de 33.60 Tn/ha, para el caso del Sistema Agroforestal Sucesional que en este caso es el que mayor contenido de biomasa subterránea tiene presenta 46.89 Tn/ha, mientras que el monocultivo almacena menos que los demás sistemas con 12.19 Tn/ha. En el suelo se estimó carbono a través del cálculo de densidad aparente y carbono orgánico del suelo, además del aporte de la biomasa subterránea correspondiente a raíces gruesas y finas. Obteniéndose carbono subterráneo en monocultivo 43.78 tC/ha, Sistema Agroforestal Simple 53.99 tC/ha y para el Sistema Agroforestal Sucesional 50.86 tC/ha.

PALABRAS CLAVES:

Carbono; biomasa terrestre; cacao; producción orgánica.

ABSTRACT:

Production systems play an important role within the ecosystems as they are generators of environmental services, ecotourism and recreation. It is intended to estimate the carbon content stored in underground biomass, in organic production systems and Cocoa Monoculture (*Theobroma cacao* L.) in the Alto Beni area of the fourth municipal section of the Sud Yungas province, Alto Beni is divided into seven colonization areas that form five groups: I-III, II, IV, V-VI, VII. Samples were taken in different systems of cocoa production: in monoculture, Simple Agroforestry System and Successive Agroforestry System, data of underground biomass, diversity of trees and soil in 9 plots of 48 * 48m. The content of underground biomass was realized by means of the sampling of cylinders for the fine roots and the use of allometric equations for the coarse roots, it was observed that in the case of the Simple Agroforestry System it has a storage of 33.60 Tn / ha, for the In the case of the Successive Agroforestry System, which in this case has the highest content of underground biomass, presents 46.89 Tn / ha, while monoculture stores less than the other systems with 12.19 Tn / ha. In the soil carbon is estimated through the calculation of apparent density and organic carbon of the soil, in addition to the contribution of the underground biomass corresponding to coarse and fine roots. Obtaining underground carbon in monoculture 43.78 tC / ha, Simple Agroforestry System 53.99 tC / ha and for the Successive Agroforestry System 50.86 tC / ha.

KEYWORDS:

Carbon; terrestrial biomass; cocoa; organic production.

AUTORES:

Fanny Eulalia Suño Hinojosa: Facultad de Agronomía. UMSA.

David Cruz Choque: Docente Facultad de Agronomía. UMSA. davidcruzchoque@yahoo.com.ar

Recibido: 15/11/2017. **Aprobado:** 15/11/2017.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las amenazas más preocupantes para el medio ambiente global, debido

su posible impacto negativo sobre la salud humana, la seguridad alimentaria, la economía, los recursos naturales y la infraestructura física (Eguren, 2004). El cambio climático es causado por el incremento de las

concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera debido a las acciones antrópicas, especialmente dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2000).

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, con un aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El CO₂ es responsable del 50 % del calentamiento global debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie de la tierra (Jobbágy y Jackson, 2000).

Alrededor del mundo se han creado numerosas políticas para mitigar el efecto del cambio climático, entre las que destaca el Protocolo de Kyoto que reconoce que las emisiones de Carbono (C) pueden disminuir si se reducen las tasas de emisión de gases a la atmósfera o bien incrementado la tasa por la cual estos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros. Dicho acuerdo reconoce como principales sumideros de C a los suelos agrícolas y forestales (ONU, 1998). Los estudios revelan que la deforestación y el cambio de uso de suelo forestal a agrícola contribuyen 17,4% del efecto invernadero mundial con las emisiones de gases (IPCC, 2007).

En proyectos de medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales generalmente no se mide el compartimiento subterráneo, debido a las dificultades para su extracción y a los altos costos; por tanto, se usan valores reportados en la literatura (MacDiken 1997, Brown *et al.* 1999, de Jong *et al.* 2000., Salimon & Brown 2000). Sin embargo, la biomasa de raíces es un importante sumidero de carbono (Sierra, 2001).

La biomasa radical es un parámetro que expresa la cantidad de biomasa (gramos de materia seca), en una unidad de área determinada en la profundidad de muestreo (g/m²), por lo que se puede tomar como parámetro para estimar la fijación de carbono en el ecosistema (Morales, 1997).

En el estudio de sistemas radicales se han separado las raíces en finas y gruesas, debido a que tienen características muy diferentes en cuanto a su crecimiento, mortalidad y función (Morales 1997, Vogt *et al.* 1997, Gill & Jackson 2000). Esta separación se hace a partir de un diámetro determinado pero este límite no es muy claro y varía entre los diferentes autores.

Dada la larga experiencia de alrededor de 30 años con las cooperativas de cacao y más de 20 años en la certificación orgánica en Alto Beni y la diversidad resultante con el que los agricultores locales manejan sus parcelas de cacao, es posible realizar una investigación de tipo comparativo, debido a la existencia de diferentes formas de producción Orgánica, no solo por los ingresos económicos que generan las familias, sino también por su contribución a la conservación de la biodiversidad y mejora de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Somarriba y Trujillo, 2005).

En el presente trabajo se compara las reservas de carbono en el estrato subterráneo, almacenado en sistemas de producción orgánica de cacao (monocultivo, Sistema Agroforestal Simple y Sistemas Agroforestales Sucesionales) y así enriquecer la escasa información existente de estudios de captura de C en los diferentes sistemas de producción orgánica manejados por los agricultores y para que los resultados sirvan para poder compararse con otros como el proyecto comparaciones de sistemas de producción de cacao a largo plazo, mismo que se realiza en la finca de Sara Ana impulsado por FiBL, AOPEB, PIAF-EL CEIBO, ECOTOP, INSTITUTO DE ECOLOGIA DE LA UMSA y PROIMPA.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El clima es un fenómeno que depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía

climática o cambio climático, ocasionada por forzamientos internos como inestabilidades en la atmósfera y el océano (Greenfacts, 2007).

El cambio climático es el principal problema ambiental global al que enfrenta la humanidad. Entre otros muchos efectos, el calentamiento global multiplica los fenómenos climáticos extremos (inundaciones, sequías, olas de calor y de frío) agrava los procesos de desertificación, erosión y supone una pérdida generalizada de la biodiversidad (Carreras, 2007).

Seiler (2013), menciona que los desastres naturales relacionados con el clima en Bolivia son frecuentes, severos y diversos, y afectan a grandes segmentos de la población, la economía y los ecosistemas. Potencialmente amplificados por el cambio climático, los peligros naturales son de creciente preocupación.

La variabilidad climática impacta a los sistemas humanos y naturales en Bolivia, principalmente a través de inundaciones y sequías, con eventos como El Niño (EN) y La Niña (LN) afectando a miles de personas y causando pérdidas económicas de millones de dólares (\$US). Los eventos EN de 1982-1983 y 1997-1998 y LN de 2007-2008 afectaron a cerca de 1.6 millones, 135 mil y 619 mil personas, con pérdidas económicas de alrededor de 837, 515 y 758 millones de \$US, respectivamente (UNDP, 2011).

Captura de Carbono en suelos

Los suelos son importantes fijadores de carbono a largo plazo, almacenados en mayor cantidad, que en la biosfera y la atmósfera combinadas. Al igual, cambios mínimos de flujos del carbono de suelos podría afectar considerablemente concentraciones atmosféricas del CO₂ (IPCC, 2000). Es posible que cambios climáticos, a causa del calentamiento global, puedan alterar el ciclo natural del carbono en los suelos (Ascarrunz & Reed, 2007).

Un buen sistema agropecuario es el que secuestra mas carbono del que emite (Mora, 2001). Las pasturas con

base en gramíneas mejoradas secuestran mas carbono en partes profundas del perfil del suelo, generalmente debajo de la capa arable (10-15 cm). Esta característica hace que este carbono este menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto su pérdida como gas invernadero (Fisher *et al.* 1994).

Biomasa Subterránea

Biomasa de las raíces, esta la representan los sistemas radicales, constituyen otro sumidero de carbono (Medina, 2006).

Las raíces, como componentes subterráneos de las plantas, son el soporte de todo el crecimiento aéreo y juegan un rol vital en el abastecimiento y almacenamiento de agua y nutrientes (Karizumi, 1974, citado por Guerra *et al.*, 2005). No obstante, la biomasa de raíces de muchas especies (en su mayoría forestales) ha sido poco estudiada, seguramente por la dificultad y lo costoso de la extracción de los sistemas radicales completos (Guerra *et al.*, 2005).

Existen dos compartimientos de almacenamiento del carbono en la biomasa subterránea: las raíces gruesas y las finas. Las raíces finas (diámetro ≤ 5 mm) son consideradas biológicamente activas y exhiben un rápido recambio (crecimiento y mortalidad), pero su contribución a la biomasa total de un bosque es muy baja (menos del 1%); en contraste, las raíces gruesas (diámetro > 5 mm) representan alta contribución a la biomasa total del bosque (20%), pero su tasa de recambio es lenta (Cairns *et al.* 1997).

La superficie del sistema radical en general es muy inferior a la correspondiente de los constituyentes del suelo, pudiendo ser del orden de 1.000 a 10.000 veces menor; por consiguiente, el movimiento de la solución del suelo (agua más solutos) hacia las superficies absorbentes de las raíces, y una buena colonización de las mismas juegan un rol protagónico en la nutrición de las plantas. Al mismo tiempo, el crecimiento del sistema radical esta estrechamente ligado a la provisión de glúcidos de la parte aérea, por lo tanto, todo factor que actúe sobre esta última,

también incidirán sobre el crecimiento y funcionamiento de la parte subterránea (Gil, 2007).

Medición de biomasa subterránea

En proyectos de medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales generalmente no se mide el compartimiento subterráneo, debido a las dificultades para su extracción y a los costos; por tanto, se usan valores reportados en la literatura. Sin embargo, la biomasa de raíces es un importante sumidero de carbono. En los bosques tropicales se puede encontrar en un rango entre 100 y 630 t/ha con promedio de 301,7 t/ha, aportando en promedio 18% de la biomasa total, con un amplio rango entre 11 y 54% (Sierra et al., 2001).

Por esta razón, la información relacionada con los contenidos de carbono que se presentan en este compartimiento y en los bosques naturales, aún se encuentra pobremente estimada (Cairns et al. 1997). De esta manera, la existencia de métodos indirectos se convierte en una buena opción realizar la estimación de los contenidos de carbono a partir de la información obtenida de la biomasa aérea.

Biomasa de raíces arbóreas

La medición y estimación de la biomasa de raíces arbóreas es considerada una ardua tarea que demanda mucho tiempo y alto costo. Siendo así, algunos proyectos optan por utilizar relaciones entre la biomasa subterránea y la biomasa sobre el suelo por medio de ecuaciones alométricas obtenidas en la literatura científica.

Por otra parte, los mismos autores describen las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de raíces de bosques que son las siguientes:

Fórmula para todos los tipos de bosques (IPCC, 2003-citando a Cairns et al. 1997)

$$y = \exp[-1.085 + 0.9256 \cdot \ln(BA)]$$

Donde:

Y = Biomasa de la raíz en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha).
ln = Logaritmo natural
exp = Elevado a potencia de.
BA = Biomasa aérea en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha).

El tamaño de la muestra para construcción de los modelos, es de 151 individuos (árboles).

Biomasa de raíces de vegetación no arbórea

La medición de la biomasa subterránea requiere la colecta de muestras de suelo por medio de cilindros de diámetros y profundidad conocidos o barrenos especiales para colecta de raíces. Los rizomas y tubérculos también son considerados parte del depósito de biomasa subterránea. Como la concentración de raíces de vegetación no arbórea es mayor en la capa superior del suelo, disminuyendo exponencialmente a la medida que aumenta la profundidad, se recomienda muestreos hasta 40 cm, estratificados de acuerdo con las siguientes cuatro profundidades del suelo: 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm, se debe registrar claramente la profundidad correspondiente de cada capa por muestra colectada. En el laboratorio, las muestras de campo pasarán por un proceso de tamizado y lavado para eliminar suelo y piedras, restando únicamente raíces. Las raíces serán secadas en horno a 70°C hasta obtenerse un peso constante, para determinar la relación entre materia seca y húmeda y la cantidad de carbono. Posteriormente las raíces serán pesadas, determinando la biomasa por unidad de superficie. Con los valores obtenidos se calcula el total de toneladas de materia seca por hectárea (t MS/ha) (Chacon et al., 2009).

Ubicación geográfica de la zona de estudio

La presente investigación se realizó en las localidades de Santa Ana, Sapecho y Covendo pertenecientes a la región de Alto Beni ubicada al noreste del Departamento de La Paz, a 270km de la ciudad, entre las coordenadas 15°10' y 15°55' latitud sur y 66°55' y 67°40' longitud oeste (Somarriba y Trujillo, 2005).

Comprende las provincias de Sud Yungas, Caranavi y Larecaja, con una superficie de 250.000 km² (López, 2001).

El paisaje está conformado por valles aluviales, pie de monte y colinas de elevada altura que varían entre 300 y 1400 metros de altitud, y 1.5% a 60% de pendiente (López, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreos de Suelos para el análisis de carbono Orgánico

Se tomo dos muestras de suelo en cada parcela, retirando previamente la capa de hojarasca, la profundidad a la que se extrajeron las muestras fue de 0-25 y 25-50 cm. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de Calidad ambiental del Instituto de Ecología de la Universidad de San Andrés.

Biomasa subterránea (raíces)

La clasificación entre raíces gruesas y finas obedece a un límite relativamente arbitrario.

– Biomasa de raíces gruesas (diámetro ≥ 5mm)

En general, los estudios de la biomasa subterránea permiten considerar las raíces gruesas como aquellas que tienen diámetro ≥ 5 mm, las cuales juegan un papel fundamental como soporte mecánico del árbol y como medio de transporte de nutrientes y agua (Orrego & Del Valle 2000).

Un análisis posterior efectuado por Brown (2002) con datos de Cairns *et al.*, (1997) mostró que existe una relación estadísticamente significativa ($n = 151$; $r^2 = 0.83$) entre la biomasa aérea y la biomasa de raíces gruesas, relación estadística que se utilizó para las estimaciones de biomasa subterránea:

$$(BRg)_{est} = \exp^{(-1,085+0,926*\ln(AGB))}$$

Donde:

$(BRg)_{est}$ = Biomasa de raíces gruesas en t ha⁻¹

AGB =Biomasa aérea total en t ha⁻¹

– Biomasa de raíces Finas (diámetro < 5mm)

Las raíces finas cumplen una importante función en la absorción de agua y nutrientes por el árbol. No obstante, la determinación de su biomasa es una tarea ardua y laboriosa (Orrego & Del Valle 2000). El procedimiento utilizado para la cuantificación de biomasa de raíces finas fue el propuesto por Schlöner *et al.* (2000). Este es un método directo destructivo que se basa en muestreo por área, las raíces finas se colectaron en tres núcleos de muestreo distribuidos al azar en la parcela de 2304 m², ya que la concentración de raíces de vegetación no arbórea es mayor en la capa superior del suelo, disminuyendo exponencialmente a la medida que aumenta la profundidad, por esa razón se realizó muestreos estratificados de acuerdo con las siguientes tres profundidades del suelo (0-10, 10-20, 20-30 cm) dos veces en el centro de cada sub parcela (Roncal – García *et al.* 2008). Las dimensiones del cilindro utilizado para la extracción de la muestra fueron 8 cm de diámetro interno por 10 cm de largo.

Para la extracción de raíces finas, las muestras traídas de campo se colocaron en una bandeja plástica y se homogenizaron independientemente, rompiendo todos los terrones y extrayendo las raíces gruesas y las piedras presentes en la muestra.

El material homogenizado se colocó en un recipiente con agua durante una noche y al día siguiente se movió con los dedos tratando de romper todos los terrones y así dejar libre las raíces, la masa de raíces finas (<0.5 mm) fue separada del suelo con ayuda de tamices de 1 y 0.5 mm, este procedimiento se realizó varias veces hasta que ya no se encontraron raíces en el suelo, restando únicamente las raíces. Posteriormente se llevó las muestras a laboratorio para ser secadas al horno a 60 °C hasta obtener peso constante, luego se realizaron los respectivos cálculos para reportar en toneladas por hectárea de materia seca de raíces (t/ha).

Estimación del contenido de carbono

Después de obtener el valor para la biomasa de en los diferentes componentes de la biomasa subterránea (t/ha) se realizó la multiplicación por el factor 0.5 (IPCC, 2003) para obtener la cantidad de carbono. Este factor es el resultado de un gran número de estudios que han demostrado que en promedio la materia vegetal contiene un 50% de carbono, siendo esta una norma establecida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 1996), (Brown & Lugo, 1992; Brown 1997; Fearnside et al., 1999).

$$CBt = B_{\text{total}} * 0,5$$

Donde:

CBt = Carbono contenido en la biomasa en t ha⁻¹

B Total = Biomasa total en t ha⁻¹

Cálculo del carbono equivalente (CO_{2e})

Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad de proyectos forestales son contabilizadas en forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CRE's) y negociadas en mercados internacionales de carbono. Un CRE corresponde a una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}), calculada en base al potencial de calentamiento global de este gas. Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO_{2e} (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12). Para saber la cantidad de CO_{2e} emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito se debe multiplicar esta por 3,67.

Determinación de CO₂ fijado:

$$CO_2 = Kr * C$$

Donde:

CO₂= Dióxido de Carbono

C = Carbono

Kr = 3.67, Factor de conversión a CO₂, resultante del cociente de los pesos moleculares del dióxido de carbono 44 y del carbono 12.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Estimación del contenido de biomasa radical en los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao

Monocultivo

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 12.19 Tn/ha como se muestra en el cuadro 3, correspondiendo a raíces finas 33.28% y 66.72% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 28.12%.

Tabla3. Biomasa Subterránea del Sistema de Monocultivo

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
4.06	8.14	12.19

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Sistema Agroforestal

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema (SAF) corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 33.60 Tn/ha como se muestra en el Cuadro 4, correspondiendo a raíces finas 32.63% y 67.37% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 26.39%.

Tabla 4. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
10.96	22.63	33.60

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS)

Las estimaciones de biomasa subterránea para este sistema (SAFS) corresponden al aporte de raíces gruesas (≥ 5 mm) y finas (< 5 mm), con un aporte total de 39.60 Tn/ha como se muestra en el Cuadro 5, correspondiendo a raíces finas 29.55 % y 70.45% a las gruesas. Ello implica una relación entre la biomasa subterránea a biomasa aérea de 25.17%.

Tabla 5. Biomasa Subterránea del Sistema Agroforestal Sucesional

Biomasa subterránea (Tn/ha)		Total (Tn/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm	
11.70	27.90	39.60

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Interacción entre sistemas

El análisis de varianza de la tabla 6 muestra que existen diferencias altamente significativas (nivel de significación 0.6 %, menor a 1%) entre los sistemas agroforestales respecto a la variable biomasa subterránea. El coeficiente de variación fue de 23.87 % lo cual indica que los datos son confiables y el ensayo se realizó dentro de los límites adecuados de precisión.

En la tabla 8 se observa que no existen diferencias significativas entre los sistemas agroforestales SAFS y SAF con promedios de biomasa subterránea de 36.6 y 33.59 t/ha. Pero se encontraron diferencias significativas entre SAFS y MONOCULTIVO con promedios de 36.6 y 12.19 t/ha respectivamente, además entre SAF y MONOCULTIVO con promedios de 33.59 y 12.19 t/ha.

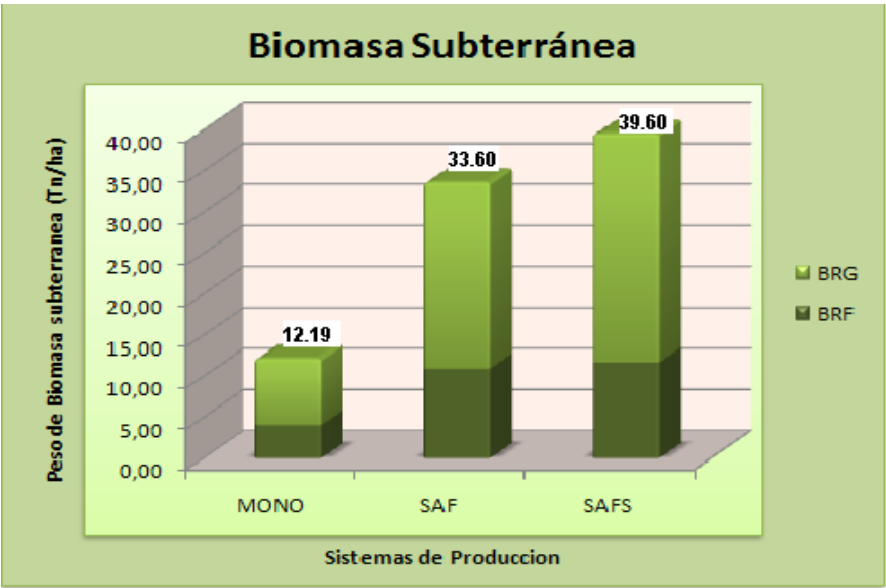


Figura 1. Biomasa subterránea en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

La biomasa radical en el primer sistema Monocultivo (12.19 tn/ha) difirió de los demás sistemas SAF (33.60 tn/ha) y SAFS (39.60 tn/ha), un factor que notablemente esta difiriendo esta variabilidad es la presencia de la diversidad de individuos existentes en los sistemas SAF y SAFS ya que este factor hace que

a mayor presencia de individuos se asignará una mayor proporción de recursos fotosintéticos para el desarrollo de un potente sistema radical en especial de raíces finas, accediendo así mayores cantidades de agua y de nutrientes. Como el mayor componente de la biomasa subterránea, los árboles de sombra juegan

un papel importante para las reservas de carbono en sistemas de cultivo de cacao de Alto Beni. Otro factor que influyó fue también las diferencias de edades de los sistemas de producción: Monocultivo fue el sistema más joven y el que tenía más edad fue el SAFS. Esto se debió a diversos criterios de selección tuvieron que tomarse en cuenta por lo que es imposible encontrar parcelas representativas de la misma edad.

Fearnside (1994) & Phillips *et al.*, (1998) indican que la proporción de biomasa aérea respecto a la biomasa del suelo en bosques tropicales es de 3:1 basado en el valor medio de tres estudios realizados en la amazonia

brasileña; sin embargo, la relación en el primer sistema fue 2,3:1, para SAF fue de 2,8:1 y SAFS presento 2,5:1.

Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC)

Monocultivo

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los primeros 25 cm se presenta en el cuadro 9, donde el 86.07% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 13.93% al aporte de raíces gruesas y finas.

Tabla 9. Carbono total Subterráneo del Sistema de Monocultivo

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
2.03	4.07	37.68	43.78

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Sistema Agroforestal (SAF)

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los 25 cm se presenta

en la tabla 10, donde el 68.89% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 31.11% al aporte de raíces gruesas y finas.

Tabla 10. Carbono Subterráneo total del sistema SAF

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
5.48	11.32	37.19	53.99

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Sistema Agroforestal Sucesional (SAFS)

La cantidad de carbono proveniente de este compartimiento y el edáfico en los 25 cm se presenta

en la tabla 11, donde el 61.07% del total del carbono subterráneo corresponde al edáfico y el restante 38.93% al aporte de raíces gruesas y finas.

Tabla 11. Carbono Subterráneo total del sistema SAFS

Carbono subterránea (tC/ha)		Edáfico (tC/ha)	Total (tC/ha)
< 5 mm	≥ 5 mm		
5.85	13.95	31.06	50.86

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Interacción de los Sistemas

La tabla 14 muestra que no existen diferencias significativas entre los sistemas de producción SAFS, SAF y Monocultivo

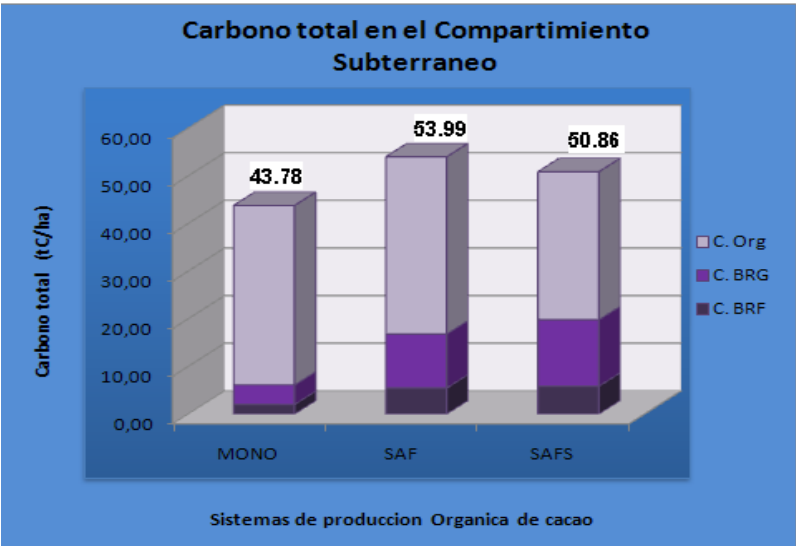


Figura 2. Carbono total en los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

Las pruebas mostraron que ningún sistema difería significativamente de otro. Sin embargo, debido a la falta de datos de referencia para las acciones iniciales del SOC de las parcelas no se puede excluir que SOC era bastante determinado por las condiciones previas que por el sistema de cultivo (véase la FAO, 2011). Otro defecto del diseño de la investigación son las diferentes edades de los sistemas de producción: Monocultivo fue el sistema mas joven y el más viejo es el SAFS. Esto se debía a diversos criterios de selección que tuvieron tenerse en cuenta, por lo que es imposible de encontrar parcelas representativas de la misma edad. Se incluyo una correlación entre biomasa y la biodiversidad de arboles esta correlación tendría que estar impulsado por los monocultivos, que son por definición menos amplia.

Las diferencias en los stocks de carbono y los aspectos de diversidad entre los sistemas agroforestales simples y de sucesión son considerables, (SAF 53.99 tC/ha y SAFS 50.86

tC/ha), si bien el SAFS tiene menor cantidad de C en el estrato subterráneo, este sistema tiene mayor cantidad de C en la parte aérea en este los diferentes pisos o estratos están repletos de plantas similares a la selva natural. A partir de la constatación de que el SAF y SAFS tienen los mayores volúmenes de carbono del estrato subterráneo a comparación del Monocultivo, llegamos a la conclusión de que estos sistemas tienen un potencial especial sobre el clima en la mitigación del cambio climático. Dos de las parcelas de SAFS se han instalado en un suelo pobre de nutrientes en base a los reportes de los productores de cacao, una en pastos y una en monocultivo de cacao (SAF2 y SAFS 3). Viera *et al.*, (2009) ha sugerido que la combinación de los principios de la restauración de los bosques y de sucesión en la agroforesteria para acelerar la restauración de la fertilidad del suelo y mejora la seguridad alimentaria de los agricultores, por lo tanto, los agricultores participan activamente en los procesos de restauración y el conflicto entre la recuperación del

suelo y la producción agrícola puede ser aliviado (Vieira *et al.*, 2009). Con respecto a los aspectos de la diversidad de árboles, las parcelas SAFS tenían, en promedio, el índice más alto de Shannon y la mayor riqueza de especies de todos los sistemas evaluados (Pillco, 2013 tesis en preparación). La biodiversidad agrícola se ha discutido como una característica importante para la capacidad de adaptación de los sistemas agroecológicos al cambio climático (Ifejika Speranza, 2010; Henry *et al.* 2009 ; Niggli *et al.* 2007) y por lo tanto , SAFS pueden considerarse prometiendo también en este contexto . Desde las estribaciones orientales de los Andes son considerados como parte de un punto caliente de la biodiversidad (Myers *et al.* 2000), los sistemas agroforestales en general y de sucesión sistemas agroforestales, en particular, pueden ser considerados como un ecosistema importante amortiguador (cf. Rice y Greenberg, 2000) . La región del Alto Beni une dos parques nacionales (Isibore Segure y Madidi) y sus sistemas agroforestales pueden desempeñar un papel importante para el intercambio de genes. Algunas especies de árboles naturales y abundantes en los bosques primarios locales, como *Swietenia macrophylla* están casi desaparecidos del ecosistema

natural por la tala selectiva. Varios autores han argumentado que agroforestería es una oportunidad para que esas especies pueden persistir en el que se enfrentan a la extinción a través sobre explotación (Bhagwat *et al.* 2008; Orozco y Somarriba2005). Asimismo, en nuestro estudio, *Swietenia macrophylla* era abundante en los sistemas agroforestales, con los agricultores que indica que estaban plantando árboles maderables para el futuro.

Estimación de la cantidad de CO₂ capturado por los diferentes sistemas de producción Orgánica de cacao (*Theobroma cacao L.*).

Existen varios métodos para estimar la cantidad de CO₂ fijado por la vegetación ; sin embargo, numerosos estudios (Brown *et al.*, 1986; Schroeder *et al.*, 1993; Hoen y Solberg, 1994; Ortiz, 1997; Ramirez *et al.*, 1997) se ha empleado uno simple para evaluar este proceso, en el cual los datos existentes de biomasa por hectárea son multiplicados por un afactor, que involucra el contenido de C (CC, en proporción) en la biomasa seca y la relación entre el peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso atómico de C (12).

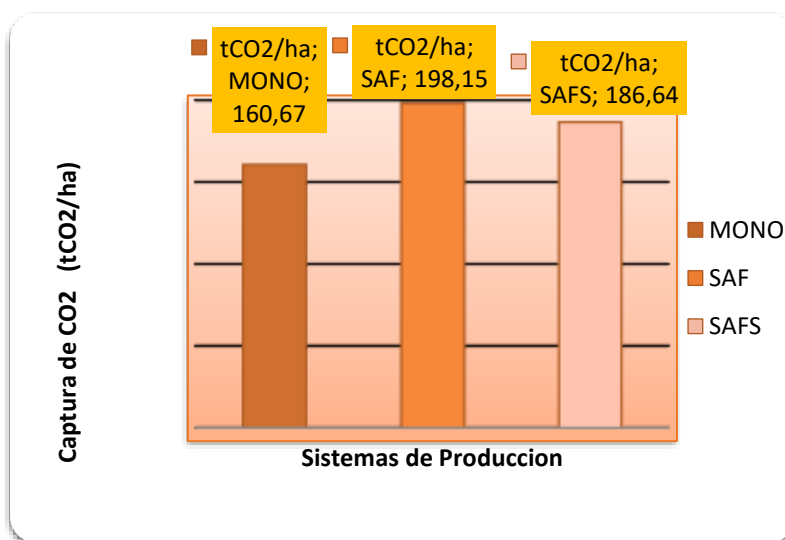


Figura 3. Captura de Dióxido de Carbono por los sistemas de producción orgánica de cacao (Monocultivo, SAF y SAFS) en las diferentes parcelas de productoras de cacao en la Zona de Alto Beni perteneciente a la cuarta sección municipal de Palos Blancos, La Paz.

La figura 3 nos muestra que la mayor cantidad de CO₂ capturado por el estrato subterráneo se encuentra en el sistema agroforestal Simple.

Las similitudes en la captura de CO₂ entre las distintas prácticas agroforestales se puede atribuir básicamente a la presencia de las especies forestales más abundantes en las prácticas agroforestales seleccionadas para el presente estudio. Debido a que las especies forestales contribuyen con un alto porcentaje en la captura de CO₂ del cacao asociado con especies forestales en la región de Alto Beni. Coincidiendo de esta manera de que las especies es uno de los factores importantes en la captura de CO₂ (Muños, 2002; Saavedra, 2005; Alvarez, 2008). Sin embargo (Pardé, 1980; Goyaso *et al.*, 2002), mencionan que además la biomasa total de un árbol varía considerablemente dependiendo de las especies, la edad y el sitio (Gomez, 1976; Madgwick, 1977)

CONCLUSIONES

La biomasa de raíces constituye una porción importante de la biomasa total en los sistemas de producción orgánica de cacao, permitiendo su estimación a partir de una variable indirecta como la biomasa aérea (para el análisis de raíz gruesa), encontrándose una relación con esta variable, respecto a la biomasa subterránea de 2,3:1 (Monocultivo), 2,8:1 (SAF) y 2,5:1 (SAFS), diferente a la de bosques amazónicos (3:1). Además el bajo costo al medir estas variables permiten realizar estimaciones con cierto grado de exactitud.

En base a los resultados obtenidos se encontró que el sistema SAFS presenta un fuerte potencial en la producción de biomasa subterránea (39.6 Tn/ha), en relación a los sistemas SAF y monocultivo, lo cual es importante destacar ello.

También aludir que el SAFS es el sistema de producción con mayor número de individuos presentes.

La cantidad de carbono estimado no difirió significativamente entre los sistemas (monocultivo 43.78 Tn/ha; SAF 53.99 Tn/ha; SAFS 50.86 Tn/ha), sin embargo debido a la falta de datos de referencia para las acciones iniciales del SOC de las parcelas no se puede excluir que SOC era bastante determinado por las condiciones previas que por el sistema de cultivo.

En el suelo de los diferentes sistemas de producción, el contenido de carbono para este bosque a una profundidad de 25 cm, tuvo un rango de aporte de 31,06 – 37.68 tC/ha, con una relación respecto al carbono aéreo de 2:1; relación influenciada por el tipo de suelo y la alta actividad biológica.

Biomasa subterránea, las reservas de SOC y la riqueza de especies fue mayor en Sistemas Agroforestales Sucesionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ascarrunz, N., & Reed, S. (2007). *Efectos de precipitación temperatura y suelo en el ciclo del carbono*. En resúmenes del V congreso Nacional de Biología. Santa Cruz, Bolivia. 150pp.
- Brown S. (1997). *Estimating biomass change of tropical forest: A primer*. Food and Agriculture Organization, Roma (UN FAO Forestry Paper, No. 134).
- Brown S. (2002). *Measuring carbon in forest: current status and future challenges*. Env. Pollut 116: 363-372.
- Brown, S. L., P. Schroeder, And J. K. Kern. (1999). *Spatial distribution of biomass in forest of the eastern USA*. Forest Ecology and Management 123: 81-90.
- Cairns, M. Brown, S., Helmer, E., Baumgardner, E. (1997). *Root biomass allocation in the world's upland forest*. Oecologia 111: 1-11.

Carreras, J; Aladro, A; Martín, L; Rosemberg, A. 2007. Consecuencias del cambio climático. Revista Sustainlabour 6 – 46 p.

Chacon, M., Rugnitz, M. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Manual Técnico 11.—1.—ed. Lima Peru.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazônica (IA). 2009.79pp.

De Jong, B. H. J., R. Tipper, And G. Montoya-Gomez. 2000. An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forest: evidence from southern Mexico. Ecological Economics 33: 313-327.

Eguren, L. 2004. El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas. Santiago, Chile, CEPAL. 83 p. (Serie Medio Ambiente y Desarrollo).

Fisher, Mj.; Rao, Im.; Ayarza, Ce.; Saenz, Ji.; Thomas, Rj, y Vera, Rr. (1994). *Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas*. Nature 31:236-238.

Guerra, J., Gayoso, J., Schlatter, J. y Nespolo, R. (2005). *Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de Pinus radiata en Chile*. Bosque 26(1): 5-21. Chile.

Gill, R. A., And R. B. Jackson. (2000). *Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems*. New Phytologist 147: 13-31.

Gil, R. (2007). *El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces*. Publicación Miscelánea N° 107. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica De Trigo Y Otros Cultivos De Invierno.

GREENFACTS. (2007). *Consenso científico sobre el Cambio Climático*. IPCC. 17 p. Revisado 15-12-12. <http://www.greenfacts.org/es/cambio-climatico-ie4-index.html>

IPCC. (2000) *Land use, Land-use Change, and Forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University, Press, Cambridge, UK.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Paris, Francia. s.e. p 2.

Jobbágy, E. G.; Jackson, R. B. (2000). *The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation*. Ecological Applications, 10: 423-36.

López, A. (2001). *Asistencia técnica y capacitación en sistemas agroforestales tipo multiestratos*. ALADI. Montevideo - Uruguay.

Macdicken, K. G. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington.

Medina, C. (2006). *Indicadores de impactos de los sistemas forestales y agroforestales*. POSAF II p 1, 28 p.

Morales, A. (1997). *Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales*. In: *Simposio Internacional - Posibilidades del Manejo Forestal Sostenible en América Tropical*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. CATIE. 11 p.

Mora, V. (2001). *Fijación, Emisión y Balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 92 p.

ONU. (1998). *Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las naciones unidas sobre el Cambio climático*. 25 p. Revisado el 28-12-16. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Orrego, S., D I. Del Valle y Moreno, F. (2000). *Medición de la captura de carbono en eco- sistemas*

forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente.

Somarriba, E. y Trujillo, L. (2005). *Proyecto "Modernización de la cacaocultura orgánica del Alto Beni, Bolivia"*. Revista Agroforestería en las Américas. CD- ROM. Centro agronómico de investigación y enseñanza CATIE. Nº 16, 12-16.

Seiler, C. (2013). *Variabilidad y Tendencias Climáticas en Bolivia*. Grupo de Ciencias del Sistema de la Tierra y Cambio Climático, Universidad y Centro de Investigación de Wageningen, Holanda, y Departamento de Cambio Climático y Servicios Ambientales, Fundación Amigos de la Naturaleza, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 19 pp.

Sierra, A. Y Valle, J., (2001). *Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en Bosques*

Sucesionales y Maduros tropicales de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia. 16 pp.

UNDP, (2011). *Tras las huellas del cambio climático en Bolivia, estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático agua y seguridad alimentaria*. 144 páginas.

Vaz, P. (2001). *Agroforestería en Brasil. Una experiencia de regeneración análoga*. Brasil. En: < <http://agriculturas.leisa.info/index> > (Revisado el 28-11-12)

Vogt, K., H. Asbjornsen, A. Ercelawn, F. Montagnin, M. y Valdes. (1997). *Roots and micorrizas in plantation ecosystems*. In E. K. S. Nambiar and A. G. Brown (Eds.). *Management of soils, nutrients and water in tropical plantation forest*, pp. 247-296. ACIAR Monograph No. 43, Canberra.

ANEXOS

Tabla 6. Análisis de varianza para la biomasa subterránea de Sistemas de Producción Orgánica de cacao

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
A	1245,165	2	622,583	13,483	,006
Error	277,051	6	46,175		
Total corregida	1522,217	8			

Fuente: Elaboración propia, 2013. Cv=23.87%

Tabla 7. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05)

	Subconjunto	
	N	
Mono	3	12,1933
SAF	3	33,5933
SAFS	3	39,6000
Sig.		1,000

Tabla 8. Pruebas de comparación de medias para la biomasa subterránea de sistemas agroforestales método Duncan (alfa=0.05)

tratamientos	Promedio de biomasa subterránea (t/ha)	Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$)
SAFS	36.6	A
SAF	33.59	A
MONO	12.19	B

Tabla 12. Análisis de varianza para la Estimación de la cantidad de carbono almacenado en la biomasa subterránea (SOC)

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
A	81,726	2	40,863	1,227	,357
Error	199,793	6	33,299		
Total corregida	281,520	8			

Tabla 13. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05)

A	Subconjunto	
	N	1
SAFS	3	31,0567
SAF	3	37,1900
Mono	3	37,6800
Sig.		,223
b. Alfa = 0,05.		

Tabla 14. Pruebas de comparación de medias para SOC, método Duncan (alfa=0.05)

Tratamientos	Promedio de la cantidad de carbono (tC/ha)	Prueba de Duncan ($\alpha=0.05$)
SAFS	43.78	A
SAF	53.99	A
MONO	50.86	A