

Las perspectivas de Biocarbón - secuestro de carbono, ciclo de nutrientes y generación de energía

Biochar prospects - carbon sequestration, nutrients cycle and energy generation

Autor



Christoph Steiner,

The University of Georgia,
Driftmier Engineering Center,
Athens, GA 30602, USA.
csteiner@enr.uga.edu

Palabras clave

Biocarbón, utilización de biomasa,
secuestro de carbono,
carbón vegetal, reciclaje de nutrientes,
palma de aceite, *Terra Preta*.

Biochar, biomass utilization, carbon
sequestration, charcoal, nutrient
cycling, oil palm, *Terra Preta*.

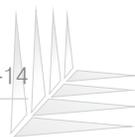
Resumen

El carbón vegetal juega un papel importante en el ciclo global del carbono. En 1993 Seifritz propuso producir carbón vegetal (biocarbón) y esparcirlo en rellenos sanitarios. Esta idea no fue bien recibida, hasta que una investigación reciente sobre *Terra Preta* reveló la importancia del carbón para mantener la fertilidad del suelo, especialmente en los trópicos húmedos. Al mismo tiempo, el creciente interés por las energías renovables planteó la posibilidad de suministrar biocarbón de pirólisis de desechos de biomasa para facilitar la producción de bioenergía y el secuestro de carbono, si el biocarbón se aplicara nuevamente a los campos agrícolas. Así, los residuos de cosecha como fuente de energía, para secuestro de C o para mejorar la calidad del suelo se complementan y no compiten entre sí. Los últimos estudios sobre biocarbón como enmienda suelo muestran efectos benéficos en la fertilidad, aparte de su contenido de nutrientes y como sumidero de CO₂ atmosférico, debido a su resistencia a la descomposición. Las plantaciones de aceite de palma registran un enorme potencial de utilización de carbón vegetal para secuestro de carbono debido al continuo suministro de biomasa durante todo el año. La carbonización (pirólisis) de los residuos de palma (cáscaras, racimos vacíos y palmas enteras durante la renovación del cultivo) puede ser la solución a algunas de las limitaciones asociadas con fertilización y plagas.

Abstract

Charcoal plays an important role in the global carbon cycle and the storage of carbon in charcoal was proposed by Seifritz in 1993. Seifritz proposed producing charcoal (biochar) and spread it on landfills. This proposal did not receive much attention until recent research on *Terra Preta* revealed the importance of charcoal to maintain soil fertility, particularly in the humid tropics. Simultaneously, the increasing interest in renewable energy raised the prospect to supply biochar from pyrolysis of waste biomass.





Pyrolysis would facilitate bio-energy production and carbon sequestration if the biochar is redistributed to agricultural fields. Thus the uses of crop residues as potential energy source or to sequester C and improve soil quality can be complementary, not competing uses. Recent research on biochar as soil amendment has shown beneficial effects on soil fertility, apart from its nutrient content, and received attention as potential sink for atmospheric CO₂, due to the biochar's recalcitrance to decomposition. Oil palm plantations have an enormous potential for biochar carbon sequestration due to the year-round supply of biomass. The carbonization (pyrolysis) of palm residues (nut shells, empty fruit bunches, and entire palms at renovation) may be the solution of several agricultural constraints associated with fertilization and pests.



Introducción

El Carbono Orgánico del Suelo (cos) juega un papel crucial en el mantenimiento de la fertilidad del suelo. Según Duxbury *et al.*, 1989) y Sombroek *et al.*, 1993) es importante separar los efectos derivados de la materia orgánica (mantenimiento y mejoramiento de la infiltración de agua, capacidad de retención de agua, estabilidad de la estructura, Capacidad de Intercambio Catiónico (cic), saludable actividad biológica del suelo de los efectos de la descomposición (fuente de nutrientes. Esto es esencial para mantener la calidad y la productividad de los suelos tropicales, particularmente donde existe una mayor proporción de suelos pobres y más susceptibles a la pérdida de cos (Feller y Beare, 1997).

La disminución en el contenido de carbono orgánico se correlaciona con el agotamiento de los nutrientes del suelo (Goldammer 1993; Hölscher *et al.*, 1997; Silva-Forsberg y Fearnside 1995; Zech *et al.*, 1990. Para la mayoría de los suelos tropicales el límite crítico y la concentración de carbono orgánico del suelo es del 1,1% (Aune y Lal, 1997).

Desde 1950, el problema de la escasez de nutrientes se ha resuelto fertilización mineral (McNeill y Winiwarter 2004. De esta manera, se mejora la producción y se reabastecen las reservas de nutrientes pero no se trata la degradación de los suelos acompañada de la pérdida acelerada de carbono orgánico que se asocia con la disminución en el rendimiento (Grace *et al.*, 1995), reducción en el reciclaje de nutrientes y menor eficiencia de los fertilizantes aplicados (Yamoah *et al.*, 2002. Gran parte de los suelos ha perdido entre el 30

y el 75% de las reservas de carbono orgánico o entre el 30 y el 40 de t C/ha. Lal, *et al.*, 2007).

¿Terra Preta: un modelo de agricultura sostenible en los trópicos?

Con frecuencia, el uso intensivo de la tierra ha dado como resultado su degradación física y química, erosión, pérdida de nutrientes y de materia orgánica. En contraste, el depósito intencional o no de materiales ricos en nutrientes en sitios o campos poblados ha producido, en muchos casos, condiciones de mayor fertilidad (Woods, 2003).

Un ejemplo de ello es el suelo oscuro, antropogénicamente enriquecido, que se encuentra en las tierras bajas de la cuenca del Amazonas, conocido como *Terra Preta de Índio*. (Figura 1. Su fertilidad es el resultado secundario del transporte de alimentos naturales y procesados, de materiales de construcción y combustibles a sitios de habitación prehistóricos (Woods, 1995. Estos materiales y sus subproductos se transformaron y se distribuyeron en la zona poblada y en las áreas de jardines asociadas. El suelo resultante contiene altas concentraciones de carbón vegetal (Glaser *et al.*, 2001a), con disponibilidad significativamente mayor de nutrientes que en los Ferralsoles y Acrisoles de los alrededores (Lima *et al.*, 2002).

La existencia de *Terra Preta* demuestra que el secuestro de carbono a largo plazo es posible y que los infértiles Ferralsoles y Acrisoles se pueden transformar en suelos fértiles permanentes a pesar de tasas de erosión 100 veces mayores que las que se encuentran en latitudes medias. Esta transformación no se logra únicamente con el reabastecimiento de nutrientes

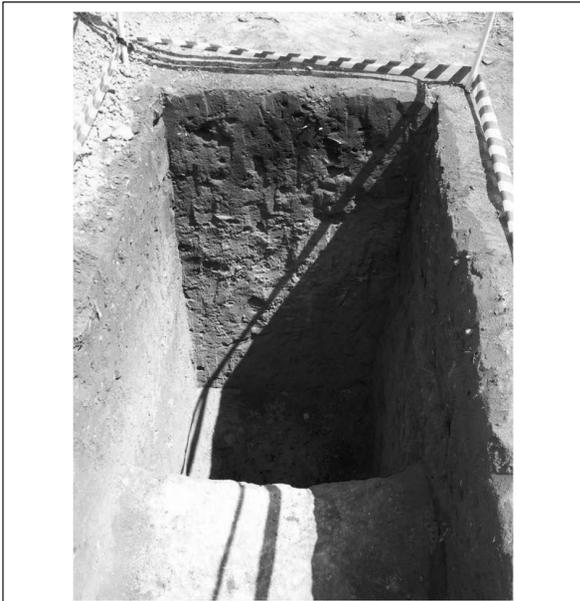


Figura 1. Perfil típico de suelo *Terra Preta*: el infértil Ferralsol se caracteriza por su fértil horizonte oscuro antropogénico (Foto: C. Steiner).

minerales, porque el carbono orgánico es de gran importancia para garantizar la retención de los nutrientes del suelo (Zech *et al.*, 1990).

Reabastecimiento de las reservas de carbono orgánico del suelo

El potencial para aumentar el carbono orgánico del suelo utilizando métodos convencionales, como por ejemplo labranza de conservación, uso de abonos y compost; conversión de monocultivos en sistemas complejos de cultivos diversos; rotaciones basadas en praderas; cultivos de cobertura de invierno y establecimiento de vegetación perenne en contornos y laderas empinadas depende del clima, del tipo de suelo y de su manejo específico (Lal *et al.*, 2007). La desventaja de enriquecimiento de carbono orgánico del suelo con métodos convencionales es que la opción de sumidero de carbono es de duración limitada.

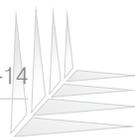
El enriquecimiento de humus sigue una curva de saturación y llega a un nuevo equilibrio después de 50 o 100 años. El nuevo nivel de carbono orgánico del suelo vuelve a caer rápidamente tan pronto como se descuida su manejo. El carbono orgánico de los suelos agrícolas aumenta únicamente si se incrementan las adiciones o se reducen las tasas de descomposición (Sauerbeck, 2001a).

La baja tasa de descomposición es una ventaja de las enmiendas al suelo con carbón vegetal (biocarbón). Seiler y Crutzen (1980) fueron los primeros en señalar la importancia de la formación de carbón vegetal para el ciclo global del carbono. En ecosistemas naturales y agrícolas, éste se produce por combustión incompleta. A medida que el carbono orgánico del suelo disminuye, debido a la actividad agrícola, la fracción de carbón vegetal más resistente aumenta como una porción de la reserva total de carbono (Skjemstad 2001; Skjemstad *et al.*, 2002; Zech y Guggenberger 1996) y puede llegar a constituir hasta un 35% de la reserva total de carbono orgánico en los ecosistemas (Skjemstad *et al.*, 2002). La datación por carbono del carbón vegetal ha mostrado que en algunos casos llega a tener más de 1.500 años de antigüedad, es relativamente estable y es una forma permanente de secuestro de carbono (Lal, 2003).

Inspirado por la recreación de *Terra Preta*, *Talar y Carbonizar* se describió como una alternativa a talar y quemar (Steiner, 2007) y actualmente algunos pobladores del Amazonas utilizan el carbón vegetal para mejorar la fertilidad del suelo. Si se quema un bosque, únicamente cerca de 2 a 3% del carbono superficial se convierte en carbón vegetal (Fearnside *et al.*, 2001), pero la producción de este carbón puede capturar el 50% del carbono superficial. Si se usan los rebrotes (barbecho o residuos de cosecha) el corte y carbonización puede convertirse en un sumidero significativo de carbono y en un importante paso hacia la sostenibilidad y la conservación del carbono orgánico del suelo.

El potencial global del biocarbón (carbón vegetal aprovechado para fines diferentes a combustible) va más allá del corte y la carbonización. Los sistemas (pirólisis) que convierten biomasa en energía (gas rico en hidrógeno) y que producen carbón vegetal como un subproducto ofrecen la oportunidad de combinar la producción de energía renovable, el secuestro de carbono y la restauración del suelo. El carbón vegetal se puede producir por combustión incompleta de cualquier biomasa y es un subproducto de la tecnología de pirólisis empleada para producir biocombustibles.

(Johannes Lehmann 2006) y Marris 2006) con su artículo *Negro es el nuevo verde* hacen énfasis en las ventajas del biocarbón a nivel mundial. Hasta el 12%



del total de las emisiones antropogénicas de carbono por el cambio en el uso de la tierra (0,21 Pg carbono) se puede compensar anualmente en el suelo, si el corte y la quema se reemplazan por corte y carbonización. Se estima que los desechos agrícolas y forestales agregan aproximadamente 0,16 Pg carbono/año. Si la demanda por combustibles renovables para el año 2100 se pudiera satisfacer con pirólisis, el secuestro de carbono podría exceder las emisiones actuales de combustibles fósiles (5,4 Pg carbono/año).

Biocarbón y fertilidad del suelo

La naturaleza recalcitrante del carbón vegetal hace que el biocarbón sea un constituyente excepcional de la materia orgánica del suelo. Vale la pena preguntarse si, además, puede o no mejorar la calidad del suelo en la misma medida en que lo hacen los materiales orgánicos degradables. Algunos estudios han demostrado que el biocarbón como enmienda al suelo es capaz de mejorar su fertilidad. El carbón vegetal mejoró significativamente el crecimiento y la nutrición de las plantas en un experimento en macetas realizado por Lehmann *et al.*, 2003) y un trabajo de campo hecho por Steiner *et al.*, 2007. Los autores concluyen que el biocarbón puede mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

Lehmann *et al.*, 2003) observaron una importante reducción en la lixiviación del fertilizante nitrogenado aplicado a las macetas que contenían biocarbón. Esto fue corroborado por Steiner *et al.*, 2008b) en pruebas de campo. La respiración y la tasa de crecimiento de las poblaciones microbianas del suelo se alteraron sustancialmente con la aplicación de biocarbón. Los mismos autores descubrieron mayor actividad microbiana en lotes donde se aplicó biocarbón y concluyeron que la disponibilidad de nutrientes en *Terra Preta* es independiente de la descomposición de la materia orgánica del suelo, cuyos efectos biológicos parecen ser esenciales porque el biocarbón tiene la capacidad de alterar la biomasa y la composición microbiana (Steiner *et al.*, 2004), (Birk 2005) porque los microbios pueden cambiar las propiedades del carbón vegetal (Glaser *et al.*, 2001a).

La mayoría de las investigaciones realizadas muestran que el uso de biocarbón como enmienda al suelo da como resultado mejores tasas de colonización de

hongos micorrícicos (Warnock *et al.*, 2007. Rondon *et al.*, 2007) advirtieron mayor fijación de nitrógeno biológico en frijol común con la adición de carbón vegetal y Gehring 2003) aumentó la ocurrencia de nódulos fijadores de nitrógeno en plantas en bosques en *Terra Preta* en comparación con los suelos adyacentes. Lehmann y Rondon 2006) revisaron 24 estudios con adición de carbón vegetal al suelo y hallaron más productividad en todos ellos, oscilando entre 20 y 220%, con tasas de aplicación de 0,4 a 8 Mg (x 10⁶) carbono/hectárea.

Secuestro de carbono por carbón vegetal

Competencia entre restauración del carbono orgánico del suelo, biocombustibles y producción de alimentos

Numerosos investigadores han prevenido sobre los efectos perjudiciales en la fertilidad del suelo si se retiran los residuos de cosecha para producción de bioenergía (Blanco-Canqui y Lal 2007; Lal 2005; 2007a; Lal 2007b; Lal y Pimentel 2007; Sauerbeck 2001b. La pirólisis con captura de carbono por carbón vegetal proporciona una herramienta para combinar el manejo sostenible del carbono orgánico del suelo (captura de carbono) y la producción de energía renovable.

Al mismo tiempo que se produce energía renovable de biomasa se puede sostener y mejorar la captura de carbono orgánico del suelo, la productividad agrícola y la calidad ambiental si la biomasa se transfiere a una reserva de carbono inactiva y se redistribuye en los campos agrícolas. Los usos de los residuos de cosecha como fuente de energía o para captura de carbono y mejoramiento de la calidad del suelo pueden ser complementarios y no entran en competencia.

Frecuentemente la biomasa (bosques, barbecho, potreros, residuos de cosecha) se quema para eliminarla, agregando CO₂ a la atmósfera únicamente para aumentos de la fertilidad del suelo marginales y de corto plazo. La quema de la biomasa (corte y quema, quema de residuos de cosecha) es una práctica común que libera casi todo el carbono almacenado en la biomasa inmediatamente como CO₂ y prácticamente no agrega carbono orgánico a los suelos agrícolas.

La acumulación y descomposición de residuos de cosecha en el campo puede causar problemas considerables en el manejo de los cultivos (Figura 2). Por ello, muchos sistemas agrícolas buscan ansiosamente alternativas a la quema de residuos. A nivel mundial, la liberación total de carbono debida a las igniciones es del orden de 4 a 7 Pg de carbono al año. Este flujo es casi tan grande como la tasa de consumo de combustibles fósiles (aproximadamente 6 Pg por año en 1990). (Goudriaan, 1995).

Se estima que la conversión de bosques tropicales contribuye globalmente hasta un 25% de las emisiones netas de CO₂ (Palm, *et al.*, 2004). Estas cifras resaltan el potencial del carbón vegetal para el manejo de carbono si se utilizara la biomasa que se quema solamente con el fin de eliminarla.

Generación de energía negativa de carbono

La captura y secuestro de carbono generalmente asume geosecuestro (captura de CO₂ en campos agotados de petróleo y gas, acuíferos salinos, etc.) como la herramienta de secuestro. Capturar carbono como CO₂ es muy costoso (Ho *et al.*, 2005). Estas tecnologías requieren elevadas inversiones de capital y proyectos a gran escala. Si se emplean para plantas termoeléctricas pueden, en el mejor de los casos, reducir las emisiones de CO₂, mientras que utilizando biomasa renovable se establecería un sumidero de carbono. La bioenergía con secuestro de carbono por carbón vegetal capturaría un máximo de 50% del carbono almacenado en la biomasa y ofrecería varias ventajas.

Para generar bioenergía carbono-negativa se propone la bioenergía con almacenamiento de carbono en carbón vegetal. Los gasificadores que producen biocarbón ofrecen una amplia gama de tamaños y complejidad tecnológica. Los proyectos descentralizados a pequeña escala son factibles y no implican muchos recursos económicos. Debido a que el biocarbón es un subproducto de gasificación, no es necesaria una tecnología de captura de carbono. No existe el riesgo de fuga de CO₂ perjudicial del carbón vegetal. La mayoría de los científicos concuerdan en que la vida media del biocarbón es del orden de siglos o milenios.

Acumulación rápida de carbono orgánico del suelo más allá de la capacidad máxima de secuestro.

De biomasa a humus se pierde una fracción considerable de carbono por procesos respiratorios y también de humus a carbono del suelo. Únicamente de 2 a 20% del C agregado como residuo sobre la superficie y la biomasa de las raíces entra a la reserva de carbono orgánico del suelo por humificación. El resto se convierte en CO₂ por oxidación y la reserva de carbono orgánico del suelo no es inerte a la oxidación (Lal, 2004). Los suelos pueden únicamente secuestrar C adicional hasta que se llegue al máximo de capacidad o saturación de C del suelo, lo que requiere un ingreso constante de biomasa y prácticas de manejo muy cuidadosas. De a 80 a 90% del carbono de residuos de cosecha en el campo se pierde por descomposición en los primeros 5 a 10 años. Por el contrario, aproximadamente el 50% del carbono se puede capturar si la biomasa se convierte en biocarbón (Lehmann *et al.*, 2006).

La existencia de *Terra Preta* demuestra que es posible el enriquecimiento del carbono orgánico del suelo, más allá de la capacidad máxima, si se hace con una forma resistente de carbono como el biocarbón. Estos suelos todavía contienen grandes cantidades de carbono orgánico derivado de biocarbón en un clima que favorece la descomposición, cientos de miles de años después de haber cesado su creación.

Potencial del sector palmero

Se han realizado estudios de factibilidad de secuestro de carbono por biocarbón en diferentes sectores agrícolas (Ogawa *et al.*, 2006), donde una plantación forestal de una planta de pulpa de celulosa en Indonesia sería similar a una plantación de palma de aceite. El plantío genera 88.370 Mg-C de residuos de madera al año, de los cuales 15.571 Mg-C podrían convertirse en biocarbón-C.

Se debería realizar un estudio similar para el sector palmero. Se estima que la producción de biomasa en las plantaciones de palma de aceite es de aproximadamente 1.6 Mg/ha/año de Racimos Vacíos (RV), 10,4 Mg/ha/año de hojas podadas y cerca de 90 Mg/hectáreas de troncos y hojas de palma durante la renovación del cultivo (Figura 2), cada 10 a 30 años (Yusoff, 2006).

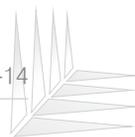


Figura 2. Acumulación de racimos vacíos en el campo y aproximadamente 90 Mg/ha de biomasa de palma de aceite en la renovación del cultivo (Foto: C. Steiner).

Los racimos vacíos representan aproximadamente el 22% de los Racimos de Fruta Fresca (RFF) y se acumulan con fibra (13,5% de RFF) y cáscaras (5,5% de RFF) en las plantas de beneficio, 1,55, 1,63 y 1,10 Mg/ha/año, respectivamente. Una planta de beneficio con capacidad para 60 Mg RFF/hr produce 83.000 Mg de RV/año (Salétes *et al.*, 2004b).

Actualmente estas fuentes de biomasa se utilizan como combustible en las plantas de beneficio o se esparcen en el campo como fertilizante orgánico. Sin embargo, estos materiales no siempre se utilizan y se queman o se acumulan en áreas cercanas a las plantas de beneficio (Figura 2). La acumulación de biomasa como racimos vacíos y troncos de palma puede causar problemas de manejo como por ejemplo mayor riesgo de ataque de enfermedades.

Los racimos vacíos o tusas tienen valor como fertilizante orgánico debido a su alto contenido de potasio (K), pero expuestos a la lluvia están sujetos a una lixiviación sustancial de los nutrientes minerales. Por tanto, cualquier demora en la aplicación conduce a una clara disminución en su valor agrícola (Salétes *et al.*, 2004a). Durante la carbonización de los residuos de cosecha (racimos vacíos) el K no se pierde: al contrario, se encuentra en concentraciones aún más altas en el biocarbón en razón a que otros elementos como O y C se volatilizan (Gaskin *et al.*, 2008). Esto facilita el transporte y almacenamiento del biocarbón y la optimización de la fertilización de acuerdo con los requerimientos de nutrientes (Figura 3).

Los racimos vacíos tienen una concentración promedio de K de 22,3 g/kg. La carbonización de racimos vacíos aumenta esta concentración a 58,7 y 65,1 g/kg, si se carbonizan a 350 °C ó 600 °C, respectivamente. Adicionalmente, los resultados preliminares sugieren que la lixiviación de minerales como K disminuye cuando los racimos vacíos se carbonizan (Bibens *et al.*, no publicado).

Potencial de secuestro de carbono

La eficiencia de conversión de biomasa a biocarbón depende de factores como la tecnología de carbonización, materia prima, temperatura y presión. El rendimiento es inversamente proporcional a la temperatura de carbonización y el contenido de carbono del biocarbón es directamente proporcional a la temperatura de producción (Antal y Grønli, 2003).

El rendimiento del carbón vegetal se puede calcular así:

$$Y_{\text{char}} = m_{\text{char}}/m_{\text{biomass}}$$

Donde m_{char} es la materia seca del biocarbón proveniente de la materia seca de la materia prima m_{biomass} . Esto no refleja el contenido de carbono fijado del biocarbón porque no lo toma en cuenta. La eficiencia de las técnicas tradicionales de carbonización oscila entre 8 y 36%. Debido a que el contenido de carbono en el biocarbón es más alto que en la materia prima se puede asumir un rendimiento más alto de carbono fijado (Y_c):

$$Y_c = Y_{\text{char}} (\% \text{char C} / \% \text{biomasa C})$$



Figura 3. Racimos vacíos (RV, izquierda) y racimos vacíos carbonizados (derecha).

Donde % char C es el % de contenido de carbono del carbón vegetal seco y % de C de biomasa es el % contenido de carbono de la biomasa seca de la materia prima. Los rendimientos de carbono fijado son de aproximadamente 50%. De esta manera, cerca del 50% del carbono de la materia prima puede ser capturado y secuestrado como biocarbón.

El peso atómico del carbono es 12 y del oxígeno es 16. La masa molecular de CO₂ es 44 (CO₂/C ratio 44/12 = 3.667. La cantidad de CO₂ capturada en biocarbón (CO₂^{biochar}) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\text{CO}_2^{\text{biochar}} = 3.667 m_{\text{char}} (\% \text{char C} / 100)$$

El contenido promedio de carbono del biocarbón es de aproximadamente 80% y una (1) tonelada métrica de biocarbón promedio puede secuestrar 2,93 toneladas de CO₂.

Se requiere un análisis completo de emisiones para estimar un sumidero de carbono. El análisis debe considerar emisiones de otros gases de efecto invernadero como por ejemplo CH₄ y N₂O. Además, debe tener en cuenta el uso alternativo de la materia prima para sistemas de empleo de la tierra. La descomposición de la materia prima puede dar lugar a emisiones considerables de CH₄. Para evaluar el potencial de secuestro de carbono del biocarbón se debe advertir que, con el mejoramiento de la fertilidad del suelo y con la sustitución de combustibles fósiles de los sistemas de pirólisis, se evita la deforestación.

Los beneficios de las técnicas de carbonización en campo son enormes en términos de volumen de biomasa (carbono. Tradicionalmente, el carbón vegetal se produce por combustión de biomasa bajo exclusión parcial de oxígeno. Esto involucra zanjas de barro, hornos, hornos de ladrillo, barriles y otros dispositivos para controlar el flujo de gas. Esta tecnología se puede

aplicar a pequeña escala y sin transporte de materia prima o biocarbón.

No obstante, estos procedimientos no explotan todos los alcances de la pirólisis en cuanto a producción de energía renovable. La pirólisis utiliza los productos de la combustión incompleta como H₂, CH₄ y otros hidrocarburos para producir energía y combustibles que son realmente importantes si se liberan a la atmósfera porque tienen más alto potencial de calentamiento global que el CO₂ (Tabla 1. Por tanto, la producción de biocarbón, sin evitar las emisiones de productos de combustión incompleta, puede producir un aumento neto en el compromiso del calentamiento global (la suma de los potenciales de calentamiento global de los gases emitidos por un proceso. (Pennise *et al.*, 2001).

Un cálculo completo del potencial de secuestro de carbono requeriría la evaluación de emisiones del destino alterno de la materia prima si no se usara para producción de biocarbón, junto con las emisiones de su producción en hornos. Se requiere un análisis completo de emisiones para hacer comparaciones precisas con otros ciclos de combustibles, como por ejemplo de CH₄ y N₂O de acumulación y descomposición o quema de biomasa.

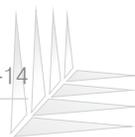
Sin embargo, las emisiones de productos de combustión incompleta se pueden evitar por medio de la quema. La investigación ha demostrado que el secuestro de carbono por el biocarbón en los trópicos húmedos es un buen incentivo para impedir mayor deforestación (Steiner, 2007), reducir emisiones de CH₄ y N₂O de los suelos (Yanai *et al.*, 2007) y facilitar el uso más eficiente de fertilizantes nitrogenados (Steiner *et al.*, 2008a. Todos estos efectos afectan positivamente el balance de carbono.

La pirólisis de desechos de biomasa también puede proporcionar combustibles líquidos y gaseosos

Tabla 1. Potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero publicado por la IPCC (Forster y Ramaswamy 2007) y emisiones por quema de biomasa (Andreae y Merlet 2001).

GHG	Potencial de Calentamiento Global			Factores de emisión de quema de biomasa ¹		
	20 años	100 años	500 años	Bosque tropical	Producción carbón vegetal	Residuos agrícolas
CO ₂	1	1	1	1.580	440	1.515
CH ₄	72	25	7,6	6,8	10,7	2,7
N ₂ O	310	289	153	0,20	0,03	0,07

¹ Los factores de emisión se dan en gramos emitidos por kilogramo de materia seca quemada



y biocarbón como enmienda al suelo (Bridgwater 1999). Idealmente, se establece donde la biomasa se acumula, por ejemplo en plantas de beneficio de aceite de palma.

Cuando se usa el biocarbón como enmienda al suelo, las emisiones que se evitan son de 2 a 5 veces mayores que cuando se usa como combustible (de 2 a 19 Mg CO₂/ha/año) y los ingresos por la comercialización de emisiones de carbono pueden justificar la optimización de la pirólisis para producción de biocarbón (Gaunt y Lehmann, 2008. Según Lal 2007b) la oferta mundial de C puede crecer hasta US\$1 billón para el año 2020 o antes. Este mercado debe ser accesible a los cultivadores de la tierra, especialmente en los trópicos donde el mantenimiento del carbono orgánico y la fertilidad del suelo es más difícil y las emisiones de CO₂ son más altas debido al cambio en el uso de la tierra.

La dificultad para calcular la absorción de gases de efecto invernadero y las emisiones resultantes del uso de la tierra, así como el Cambio en los Usos de la Tierra y la Silvicultura (lulucf, por sus siglas en inglés), la destrucción de los sumideros con los incendios forestales o las enfermedades no aplican para biocarbón como enmienda al suelo a pesar de que el carbón vegetal como sumidero de carbono es fácilmente cuantificable.

Existe un creciente consenso en torno a que el secuestro de biocarbón debería ser considerado como un tipo de sumidero de carbono bajo la cmnucc.

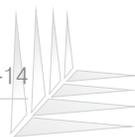
El interés de la comunidad agrícola en el biocarbón se está expandiendo por todo el mundo. De ahí que los interesados en el tema deban participar en el diálogo del régimen climático posterior a 2012.



Bibliografía

- Andreae, M. O.; Merlet, P. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(5), 955-966.
- Antal, M. J.; Grønli, M. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619-1640.
- Aune, J. B.; Lal, R. 1997. Agricultural productivity in the tropics and critical limits of properties of oxisols, ultisols and alfisols. *Tropical Agriculture*, 74, 96-103.
- Birk, J. J. 2005. *Einfluss von Holzkohle und Düngung auf die mikrobielle Zersetzungsgemeinschaft und den Streuumsatz in amazonischen Ferralsols*. Diplomarbeit, University of Bayreuth Bayreuth (Germany).
- Blanco-Canqui, H.; Lal, R. 2007. Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. *Geoderma*, 141, 355-362.
- Bridgwater, A. V. 1999. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 3-22.
- Duxbury, J. M.; Smith, M. S.; Doran, J. W.; Jordan, C.; Szott, L.; Vance, E. 1989. *Soil Organic Matter as a Source and a Sink of Plant Nutrients*. In: *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*, D. C. Coleman, J. M. Oades, and G. Uehara, eds.; University of Hawaii Press, Honolulu (United States), 33-67.
- Fearnside, P. M.; Lima, P. M.; Graça, A.; Rodrigues, F. J. A. 2001. Burning of Amazonian rainforest: burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 146, 115-128.
- Feller, C.; Beare, M. H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Forster, P.; Ramaswamy, V. 2007. *IPCC Fourth Assessment Report, Working Group I Report The Physical Science Basis*, Chapter 2 Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. IPCC, Geneva (Switzerland).
- García-Núñez, J. A. 2005. *Determination of kinetic constants and thermal modeling of pyrolysis of palm oil mill solid wastes*. Masters, University of Georgia (Athens).
- Gaskin, J. W.; Steiner, C.; Harris, K.; Das, K. C.; Bibens, B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061-2069.
- Gaunt, J. L.; Lehmann, J. 2008. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental Science & Technology. Environ. Sci. Technol.*; 42(11), 4152-4158.
- Gehring, C. 2003. *The role of biological nitrogen fixation in secondary and primary forests of Central Amazonia*. PhD, University of Bonn, Bonn (Germany).
- Glaser, B.; Guggenberger, G.; Haumaier, L.; Zech, W. 2001a. *Persistence of Soil Organic Matter in Archaeological Soils (Terra Preta) of the Brazilian Amazon Region*. In: *Sustainable management of soil organic matter*, R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell, and C. A. Watson, eds.; CABI Publishing, Wallingford (United States), 190-194.

- Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W. 2001b. *The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics*. *Naturwissenschaften*, 88, 37-41.
- Glaser, B.; Lehmann, J.; Steiner, C.; Nehls, T.; Yousaf, M.; Zech, W. (Year. *Potential of pyrolyzed organic matter in soil amelioration*. International Soil Conservation Organization Conference, International Soil Conservation Organization, Beijing (China), 421-427.
- Goldammer, J. G. 1993. *Historical biogeography of fire: tropical and subtropical*. In: *Fire in the Environment: The Ecological Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*, P. J. Crutzen and J. G. Goldammer, eds.; John Wiley & Sons Ltd, 297-314.
- Goudriaan, J. 1995. *Global Carbon and Carbon Sequestration*. In: *Carbon sequestration in the biosphere. Processes and prospects.*; M. A. Beran, ed.; Springer Verlag, Heidelberg, Berlin (Germany), 3-18.
- Grace, P. R.; Oades, J. M.; Keith, H.; Hancock, T. W. 1995. Trends in wheat yields and soil organic carbon in the permanent Rotation Trial at the Waite Agricultural Research Institute, South Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35, 857-864.
- Ho, M. T.; Allinson, G.; Wiley, D. E. 2005. Comparison of CO₂ separation options for geo-sequestration: are membranes competitive? *Desalination*, 192, 288-295.
- Hölscher, D.; Ludwig, B.; Möller, R. F.; Fölster, H. 1997. Dynamic of soil chemical parameters in shifting agriculture in the Eastern Amazon. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 66, 153-163.
- Lal, R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), 151-184.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-1627.
- Lal, R. 2005. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, 31, 575-584.
- Lal, R. 2007a. Farming carbon. *Soil & Tillage Research*, 96, 1-5.
- Lal, R. 2007b. Soil science and the carbon civilization. *Soil Sci Soc Am J*, 71, 1425-1437.
- Lal, R.; Follett, R. F.; Stewart, B. A.; Kimble, J. M. 2007. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 172(12), 943-956.
- Lal, R.; Pimentel, D. 2007. Biofuels from crop residues. *Soil & Tillage Research*, 93, 237-238.
- Lehmann, J.; da Silva Jr.; J. P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249, 343-357.
- Lehmann, J.; Gaunt, J.; Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403-427.
- Lehmann, J.; Rondon, M. 2006. Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. In: *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, N. U. e. al.; ed.; CRC Press, Boca Raton, FL (United States), 517-530.
- Lima, H. N.; Schaefer, C. E. R.; Mello, J. W. V.; Gilkes, R. J.; Ker, J. C. 2002. Pedogenesis and pre-colombian land use of Terra Preta Anthrosols (Indian black earth) of Western Amazonia. *Geoderma*, 110, 1-17.
- McNeill, J. R.; Winiwarter, V. 2004. Breaking the Sod: humankind, history, and soil. *Science*, 304, 1627-1629.
- Ogawa, M.; Okimori, Y.; Takahashi, F. 2006. "Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: Three case studies". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 429-444.
- Pennise, D. M.; Smith, K. R.; Kithinji, J. P.; Rezende, M. E.; Raad, T. J.; Zhang, J.; Fan, C. 2001. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 106(D20), 24143-24155.
- Rondon, M. A.; Lehmann, J.; Ramirez, J.; Hurtado, M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, DOI 10.1007/s00374-006-0152-z.
- Salétes, S.; Caliman, J.-P.; Raham, D. 2004a. Study of mineral nutrient losses from oil palm empty fruit bunches during temporary storage. *Journal of Oil Palm Research*, 16(1), 11-21.
- Salétes, S.; Siregar, F. A.; Caliman, J.-P.; Liwang, T. 2004b. Ligno-cellulose composting: case study on monitoring oil palm residuals. *Compost Science & Utilization*, 12(4), 372-382.
- Sauerbeck, D. R. 2001a. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture - perspectives and limitations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, 253-266.
- Sauerbeck, D. R. 2001b. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture - perspectives and limitations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60(1-3), 253-266.
- Seifritz, W. 1993. Should we store carbon in charcoal? *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(5), 405-407.
- Seiler, W.; Crutzen, P. J. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, 2(3), 207-247.
- Silva-Forsberg, M. C.; Fearnside, P. M. 1995. Agricultural management of caboclos of the Xingu river: a starting point for sustaining populations in degraded areas in the Brazilian Amazon. In: *Management and Rehabilitation of Degraded Lands and Secondary Forests in Amazonia*, J. A. Parrotta and M. Kanashiro, eds.; *International Institute of Tropical Forestry*, Rio Piedras (Puerto Rico), 90-95.
- Skjemstad, J. (Year. Charcoal and other resistant materials. Net Ecosystem Exchange Workshop Proceedings, *Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting*, Canberra ACT 2601 (Australia), 116-119.
- Skjemstad, J. O.; Reicosky, D. C.; Wilts, A. R.; McGowan, J. A. 2002. Charcoal carbon in US agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1249-1255.
- Sombroek, W. G.; Nachtergaele, F. O.; Hebel, A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22(7), 417-426.
- Steiner, C. 2007. Slash and char as alternative to slash and burn - Soil charcoal amendments maintain soil fertility and establish a carbon sink. *Dissertation*, University of Bayreuth, Bayreuth (Germany).
- Steiner, C.; Glaser, B.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Blum, W. E. H.; Zech, W. 2008a. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered Central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 893-899.



- Steiner, C.; Glaser, B.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Blum, W. E. H.; Zech, W. 2008b. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered Central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- Steiner, C.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Nehls, T.; Macêdo, J. L. V. d.; Blum, W. E. H.; Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291(1-2), 275-290.
- Steiner, C.; Teixeira, W. G.; Lehmann, J.; Zech, W. 2004. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and amazonian dark earths in Central Amazonia - Preliminary results. In: *Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time*, B. Glaser and W. I. Woods, eds.; Springer Verlag, Heidelberg (Germany), 195-212.
- Warnock, D. D.; Lehmann, J.; Kuyper, T. W.; Rillig, M. C. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9-20.
- Woods, W. I. 1995. Comments on the black earths of Amazonia. In: *Papers and Proceedings of the Applied Geography Conferences*, F. A. Schoolmaster, ed.; Applied Geography Conferences, Denton, Texas (United States), 158-165.
- Woods, W. I. 2003. Development of Anthroisol Research. In: *Amazonian dark earth: origin, properties, management*, J. Lehmann, D. Kern, B. Glaser, and W. Woods, eds.; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 3-14.
- Yamoah, C. F.; Bationo, A.; Shapiro, B.; Koala, S. 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Field Crops Research*, 75, 53-62.
- Yanai, Y.; Toyota, K.; Okazaki, M. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science & Plant Nutrition*, 53(2), 181-188.
- Yusoff, S. 2006. Renewable energy from palm oil - innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14, 87-93.
- Zech, W.; Guggenberger, G. 1996. Organic matter dynamics in forest soils of temperate and tropical ecosystems. In: *Humic substances in terrestrial ecosystems*, A. Piccolo, ed.; Elsevier.
- Zech, W.; Haumaier, L.; Hempfling, R. 1990. Ecological aspects of soil organic matter in the tropical land use. In: *Humic substances in soil and crop sciences; selected readings*, P. McCarthy, C. E. Clapp, R. L. Malcolm, and P. R. Bloom, eds.; American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison (United States), 187-202.