

Title:

Rendimiento de la producción de biocarbón en chacras tradicionales amazónicas

Author:

Anders Henrik Sirén¹

E-mail: anders.siren@uaw.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4159-4506>

¹Universidad Intercultural de las Nacionalidades y Pueblos Indígenas Amawtay Wasi.

2026-03-13

Peer review status: This is a non-peer reviewed preprint submitted to EcoEvoRxiv

Rendimiento de la producción de biocarbón en chacras tradicionales amazónicas

Palabras clave: Agricultura itinerante, biocarbón, chacra, eliminación de carbono,

Abstract

La elaboración y enmienda al suelo de biocarbón, utilizando como materia prima la biomasa leñosa de los árboles de barbecho en la agricultura itinerante, ha sido anteriormente identificada como una técnica prometedora para la eliminación de carbono (C) de la atmósfera. Realizamos ensayos en campos de agricultura itinerante tradicional de la nacionalidad indígena Kichwa en la Amazonía ecuatoriana. En base de los resultados se pudo descartar la preocupación que antes había de que, en el ambiente muy húmeda de la Amazonía occidental, pueda ser difícil secar la materia prima suficientemente para evitar emisiones excesivas del potente gas de invernadero metano (CH_4) – la proporción de materia seca en la materia prima fue de entre 78% y 81%, bien sobre el límite recomendado de 75%. En promedio se necesitó 391 horas de trabajo por tonelada de C capturada en biocarbón. Considerando el salario mínimo oficial en el Ecuador, que corresponde a 2,90 USD/hora, ello implica un costo relativamente alto en comparación con otros métodos de eliminación de carbono. En otros países donde se practica la agricultura itinerante, sin embargo, los niveles del salario mínimo generalmente es mucho más bajo, implicando que ahí esto ya puede ser una técnica de eliminación de carbono no solo técnicamente sino también económicamente factible. Se estableció también que el grosor de los trozos de leña poco afectaba su proporción de materia seca, implicando que se podría disminuir las horas de trabajo dedicados a la fragmentación de la materia prima, así reduciendo el costo de producción.

Introducción

Biocarbón es el material sólido, con un alto contenido de carbono elemental (C), obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en condiciones de oxígeno limitado (Iniciativa Internacional del Biocarbón, 2015). Cuando es incorporado al suelo puede permanecer ahí durante cientos o incluso miles de años sin descomponerse. De esta manera impide que el carbono regrese al atmósfera en forma de CO_2 a través del proceso natural de descomposición biológica, así contrarrestando el cambio de clima global que resulta por el aumento del contenido de CO_2 en la atmósfera a causa principalmente de la quema de combustibles fósiles (Fig. 1) por lo que esto es considerado un enfoque prometedor para eliminar el carbono de la atmósfera (Jia et al., 2019; Liu et al., 2023; Weng & Cowie, 2025). Ventajas adicionales son que las enmiendas de biocarbón a los suelos agrícolas suelen mejorar la calidad del suelo, así incrementando el crecimiento de árboles (Ríos-Guayasamín et al. 2024) y el rendimiento de los cultivos (Coomes y Miltner, 2017; Islami et al., 2011; Jeffery et al., 2017) y, además pueden reducir la absorción de metales pesados en los cultivos (Bravo et al., 2019, Virú-Vasquez et al., 2025). El incremento del crecimiento de las plantas en suelos enmendados con biocarbón no es, sin embargo, algo universal, por ejemplo Valarezo et al. (2016) muestran un ejemplo de la Amazonía ecuatoriana en cual la enmienda de biocarbón tiene impacto consistente alguna en el crecimiento de árboles sembrados.

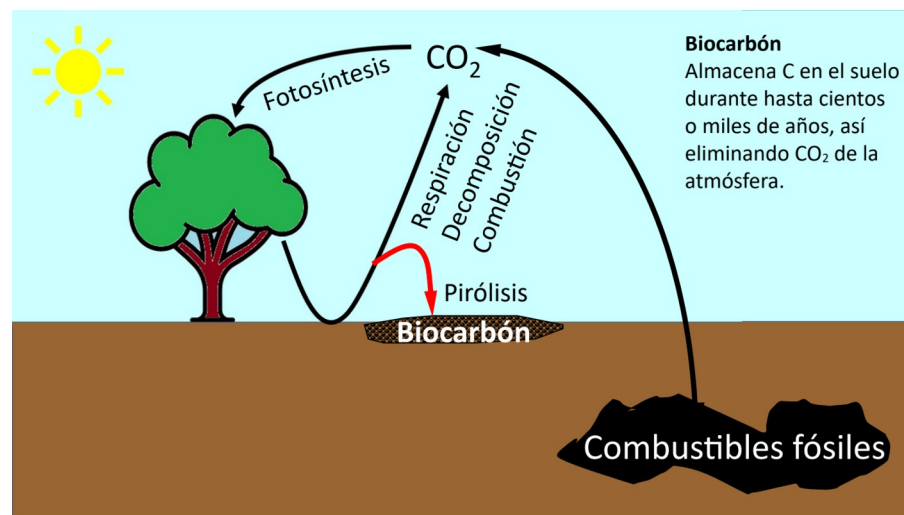
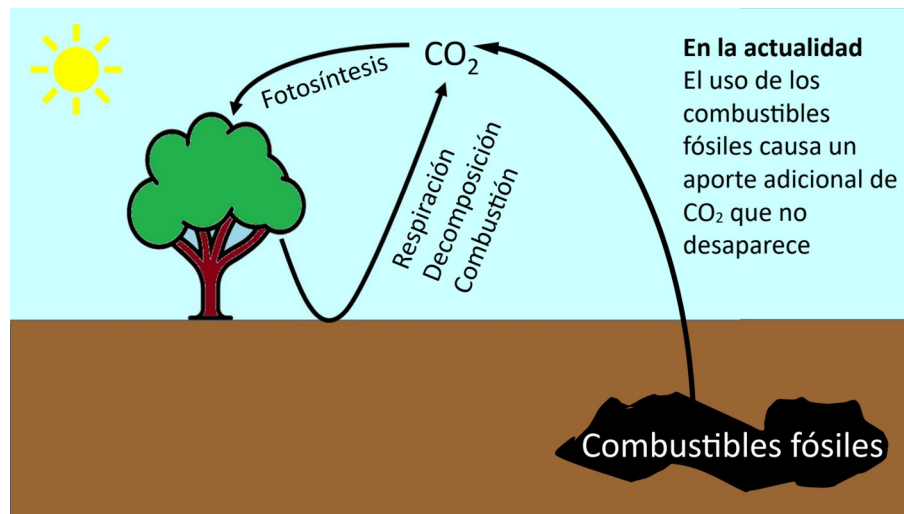
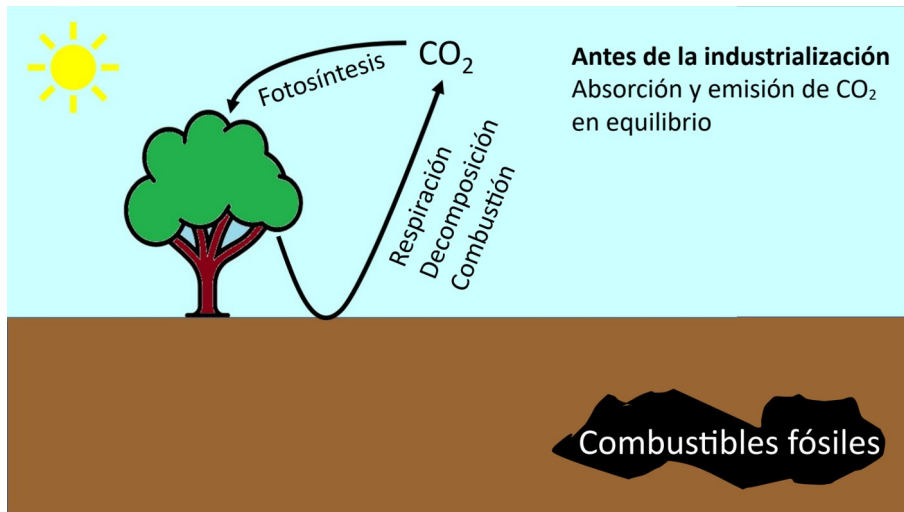


Figura 1. El principio de la eliminación de CO_2 de la atmósfera en base de la elaboración de biocarbón.

Para evitar consecuencias ambientales negativas, no se debe utilizar materia prima de materia prima proveniente de ecosistemas prístinos, y tampoco cultivar biomasa con el único propósito de usarlo para hacer biocarbón, sino la materia prima para la producción de biocarbón debe consistir exclusivamente en biomasa excedente o de desecho, cuyo contenido de C de todas maneras muy pronto hubiera regresado al atmósfera a través de descomposición biológica o combustión. Ya hace dos décadas se identificó, como una de las mayores tales potenciales fuentes de biomasa a nivel mundial, la agricultura itinerante (Lehmann et al. 2006). La agricultura itinerante es un sistema agrícola muy extendido en los trópicos. En el cultivo itinerante, a un período de cultivo relativamente corto —normalmente de 1 a 3 años— le sigue un período de barbecho más largo, tras el cual de nuevo se despeja el bosque en barbecho y se vuelven a plantar cultivos (véase Mertz et al. 2009 para un análisis de las diferentes variantes de este patrón básico). Las *chacras* tradicionales de las nacionalidades indígenas amazónicas en el Ecuador son ejemplos de tal agricultura itinerante.

Aunque ha habido un boom de investigaciones sobre biocarbón hecho utilizando materias primas derivadas de la agricultura industrial, las operaciones forestales, las aguas residuales, el estiércol y los residuos industriales (Fawzy et al. 2021; Lehmann et al. 2021), las investigaciones sobre biocarbón en la agricultura han sido mayormente limitados a estudios de escritorio con fines de cuantificar su potencial mundial para eliminación de C de la atmósfera (Lenton, 2010, 2014; Lehmann et al., 2006). Sin embargo, Sirén (2025), además de estimar el potencial técnico global de eliminación de carbono de la atmósfera mediante la producción de biocarbón y su incorporación a los suelos en los sistemas de cultivo itinerante a 0,42 Gt C/año, correspondiendo a un 4% de las emisiones anuales actuales, también incorporó experimentos prácticos, elaborando biocarbón de manera artesanal, utilizando motosierra, hachas y machete para fraccionar la materia prima y realizando el pirólisis en hornos de cortina de llama consistiendo en simples fosas de tierra (cf. Pandit et al., 2017). Basado en tales experimentos, calculó el costo por tonelada de C eliminado a 355 USD/t CO₂ dado el nivel del costo de mano de obra en el Ecuador, y notó que este costo sería considerablemente más bajo en países donde los niveles salariales son más bajos como, por ejemplo, 33 USD/t CO₂ en la India o 11 USD/t CO₂ en el DR Congo. También identificó como los principales desafíos prácticos que quedaban a resolver, el asegurar un secado suficiente y el efectivizar el fraccionamiento de la materia prima para disminuir las horas de trabajo por tonelada de biocarbón producida y así reducir el costo correspondiente.

El secado es importante porque si se usa materia prima húmeda, el pirólisis puede causar emisiones de metano, que es un potente gas de invernadero, así agravando el calentamiento global en vez de mitigarlo (Cornelissen et al., 2023). Por lo tanto, se recomienda que la materia prima tenga una proporción de materia seca no menor a 75% (Ithaka Institute, 2024). El fraccionamiento de la materia prima, en su turno, es necesario no solo para acelerar el secado, sino también para un eficiente pirólisis, independientemente del nivel de su contenido de humedad.

El objetivo del presente estudio fue trabajo presenta resultados preliminares de un proyecto de investigación que tiene como objetivos de 1) Desarrollar una metodología apropiada de mediciones de campo que permitirá la evaluación de la eficiencia de las diferentes estrategias de producción de biocarbón en la agricultura itinerante, y 2) Establecer parcelas permanentes para la comparación de diferentes estrategias de producción de biocarbón, y recolectar datos de línea base.

Materiales y métodos

Iniciando en el mes de agosto y finalizando en el mes de octubre del 2025, así aprovechando la estación seca, elaboramos biocarbón en tres chacras tradicionales amazónicas en la comunidad Kichwa de Sarayaku ($1^{\circ}44' \text{ S}$, $77^{\circ}29' \text{ W}$) en la provincia de Pastaza en la Amazonía ecuatoriana, con permiso de los respectivos dueños, quienes también participaron en el trabajo de campo de los ensayos. Establecimos en cada chacra cuatro parcelas de ensayo adyacentes de 12×12 metros. Luego de que se haya tumbado los árboles en cada una de ellas medimos el volumen de biomasa leñosa utilizando el *método de intersección planar* (Van Wagner, 1982), trazando transectos de una densidad de $0,49 \text{ m}^{-1}$ para materia de diámetro mayor a 8 cm, $0,17 \text{ m}^{-1}$ para la de diámetro de entre 4 y 8 cm, y $0,06 \text{ m}^{-1}$ para diámetros de entre 1 y 4 cm. Para materia de diámetro mayor a 8 cm se midió la circunferencia con . Además, seleccionamos los 10 troncos más voluminosos en cada parcela según medida ocular, los identificamos según la taxonomía local, y recolectamos muestras de madera de ellos para su posterior análisis en laboratorio, así determinando la densidad de cada especie.

Cortamos toda madera en trozos de aproximadamente 40 cm de largo y luego lo partimos en pedazos de leña de aproximadamente 4 cm de grosor, utilizando un tipo de hacha mecánica que permitió trabajar más rápido que con una hacha normal (Fig. 2). Trozos de un diámetro inferior a aproximadamente 8 cm dejamos sin partir. Luego apilamos la leña y la dejamos secar varias semanas en el lugar (Fig. 3). Siguiendo los pronósticos del clima, realizamos el pirólisis siempre luego de que haya habido varios días de sol.



Figura 2. Partiendo la leña con una hacha mecánica



Figura 3. Materia prima apilada para su secado.



Figura 4. Pirólisis en un horno de cortina de llama.



Figura 5. Parcela experimental con biocarbón añadida (derecha) y parcela testigo sin biocarbón (izquierda).

El pirólisis realizamos en las mismas chacras en *hornos de cortina de llama*, consistiendo de una fosa excavada en el suelo (Fig. 4). El principio de dichos hornos es que las llamas en la superficie consumen todo el oxígeno, además de producir calor, así proveyendo a las capas inferiores las condiciones de alta temperatura y ausencia de oxígeno necesarias para que ocurra el pirólisis y se acumule el biocarbón. Una vez que la fosa se llenaba, apagamos el fuego primero con agua, cargada en los hombros desde la fuente más cercana, y luego tapando la fosa con tierra. Varios días después regresamos para abrir la fosa, sacar el biocarbón y añadirlo al suelo en las parcelas de ensayo donde posteriormente evaluaremos los efectos del biocarbón en el suelo y los cultivos (Fig. 5). En una de las chacras no logramos apagar bien el fuego en la fosa, de manera que cuando regresamos ya se había quemado aproximadamente la mitad del biocarbono, dejando solo ceniza. Por lo tanto, algunos de los resultados presentaremos tan solo de dos de las chacras.

Mientras añadiendo leña al horno, tomamos muestras de leña de la tercera capa desde abajo y la tercera capa desde arriba en las pilas correspondiendo a los árboles previamente enumerados, midiendo su grosor y guardando en bolsas plasticas de Ziploc para su posterior análisis de su proporción de materia seca. Al vaciar el horno para añadir el biocarbón al suelo en las parcelas de ensayo contabilizamos cada balde, para así calcular el volumen del biocarbón producido. También sacamos muestras de biocarbón para posteriormente medir su densidad seca en laboratorio, y así poder calcular el peso total de biocarbón producido. En laboratorio primero pesamos las muestras, los pre-secamos en 87°C durante varias horas, y luego las secamos en 105°C hasta que su peso cambiaba menos de 0.1% por hora, y ahí registramos su peso seco. En base de ello luego calculamos su proporción de materia seca y su contenido de C. Para los cálculos del contenido de C, utilizamos los valores estándar de 50% C en madera y 75,7% C en biocarbón (peso seco).

Resultados-discusión

Los resultados principales se presente en la Tabla 1. Un importante resultado fue que leña resultó ser, con margen, suficientemente seca, con una proporción de materia seca de 78% a 81% en las tres chacras, bien sobre el nivel minimo propuesto de 75% (cf. Ithaka Institute, 2024), aunque falta todavía para el nivel de 85% que se considera ideal. Cabe notar, sin embargo, que hubo unos valores atípicos, con algunos trozos de leña teniendo una proporción de materia seca mucho más baja, llegando incluso hasta tan solo 36%. No está bien clara la causa de estos valores atípicos, representando trozos de leña mucho más húmedos de lo permisible, pero obviamente hay aquí todavía un potencial de mejorar los procedimientos para que la materia prima se seque aún más.

Hubo una moderada variabilidad de la densidad promedio de la madera en las tres chacras respectivas, a causa de cierta variabilidad en la composición de diferentes especies de árboles, aunque la especie de *pigue* (*Piptocoma discolor*) dominaba en todas las chacras, representando un estimado 51% de la biomasa leñosa total. Hubo una variabilidad bastante marcada en cuanto a la densidad del biocarbón producido, desde las 0.084 a las 0.129 toneladas/m³. Incluso el mayor de estos valores, además, fue inferior al valor de 0.140 toneladas/m³ que anteriormente Sirén (2025) había utilizado como valor estándar para sus cálculos, basado en Werdin et al. (2020).

Tabla 1. Los resultados de los ensayos. Vea el texto principal para explicaciones.

	Chacra 1	Chacra 2	Chacra 3
Volumen de materia prima (m ³)	2,15	2,06	9,19
Fracción de materia seca en la materia prima	81%	78%	78%
Densidad de materia prima (t/m ³)	0,365	0,331	0,393
Cantidad de C en materia prima (t)	0,39	0,34	1,81
Volumen de biocarbón (m ³)	2,22	2,17	
Densidad de biocarbón (t/m ³)	0,100	0,084	0,129
<i>Fracción de C en el biocarbón</i>	<i>75,7%</i>	<i>75,7%</i>	
Masa de C en el biocarbón (t)	0,168	0,138	
Fraction de C en la materia prima convertida en C en el biocarbón	43%	40%	
Tiempo de mano de obra empleada (h)	51,6	65,5	
Mano de obra empleada por volumen de materia prima (h/m ³)	24	32	
<i>Sueldo mínimo en Ecuador (USD/h)</i>	<i>\$2,90</i>	<i>\$2,90</i>	
Costo total de mano de obra (USD)	\$149	\$190	
Mano de obra empleada por masa de C en el biocarbón (h/t)	307	475	
Costo por masa de C en el biocarbón (USD/t)	\$889	\$1,375	
Costo por masa de CO ₂ e en el biocarbón (USD/t)	\$242	\$375	

La proporción de C de la materia prima que quedó secuestrado en el biocarbón fue de 43% y 40%, respectivamente, lo que son valores bastante normales para pirólisis en hornos de cortina de llamas (cf. Cornelissen et al., 2016). Las horas de trabajo requeridas para procesar cada metro cúbico de materia prima se redujo bastante de las 48 horas registradas previamente (cf. Sirén, 2024) a tan solo 24 y 32 horas, en la chacra 1 y 2, respectivamente. Ello se atribuir por una parte al uso de las hachas mecánicas, que ahorraron mucho tiempo, y también a la experiencia acumulada adquirida que cada vez ha permitido mejor optimizar los procedimientos.

La cantidad de trabajo requeridos para por tonelada de C en el biocarbón resultante variaba de 307 a 475 horas, es decir 38 a 59 días. Calculando con el salario mínimo actual oficialmente establecido en el Ecuador, de 594 USD/mes incluyendo beneficios sociales, y un estimado promedio de 20,8 días laborables, de 8 horas, a la

semana, ello implica un costo de 299 y 462 USD/t CO₂e, respectivamente, en las dos chacras. Esto se puede comparar con los precios de créditos de carbono basados en biocarbón en el mercado voluntario, los cuales últimamente han sido de entre 130 y 150 USD/t CO₂e, (Puro.Earth, 2025) y también los impuestos al carbono que en la actualidad llegan a un máximo de 135 USD/t CO₂e en Uruguay (Dolphin & Merkle, 2024). Es decir que el costo es todavía relativamente alto, pero cabe notar que, debido a la dolarización, el costo de mano de obra en el Ecuador, donde se realizó estos ensayos, es mucho mayor que en la mayoría de los países donde se practica la agricultura itinerante. En los países de Africa tropical y el Sur de Asia, generalmente el salario mínimo es entre 8 y 35 veces menor que en el Ecuador (Wikipedia, 2026), lo que implica que ahí la producción de biocarbón en la agricultura itinerante podría ser un método de eliminación de carbono que ya es no solo técnicamente sino también económicamente factible. Por otra parte se evidenció que la proporción de materia seca aumentaba levemente con menor grosor y con hora más tardía del día. Sin embargo, al eliminar tres valores atípicos (*outliers*) del análisis estos efectos prácticamente desaparecieron (Fig. 6).

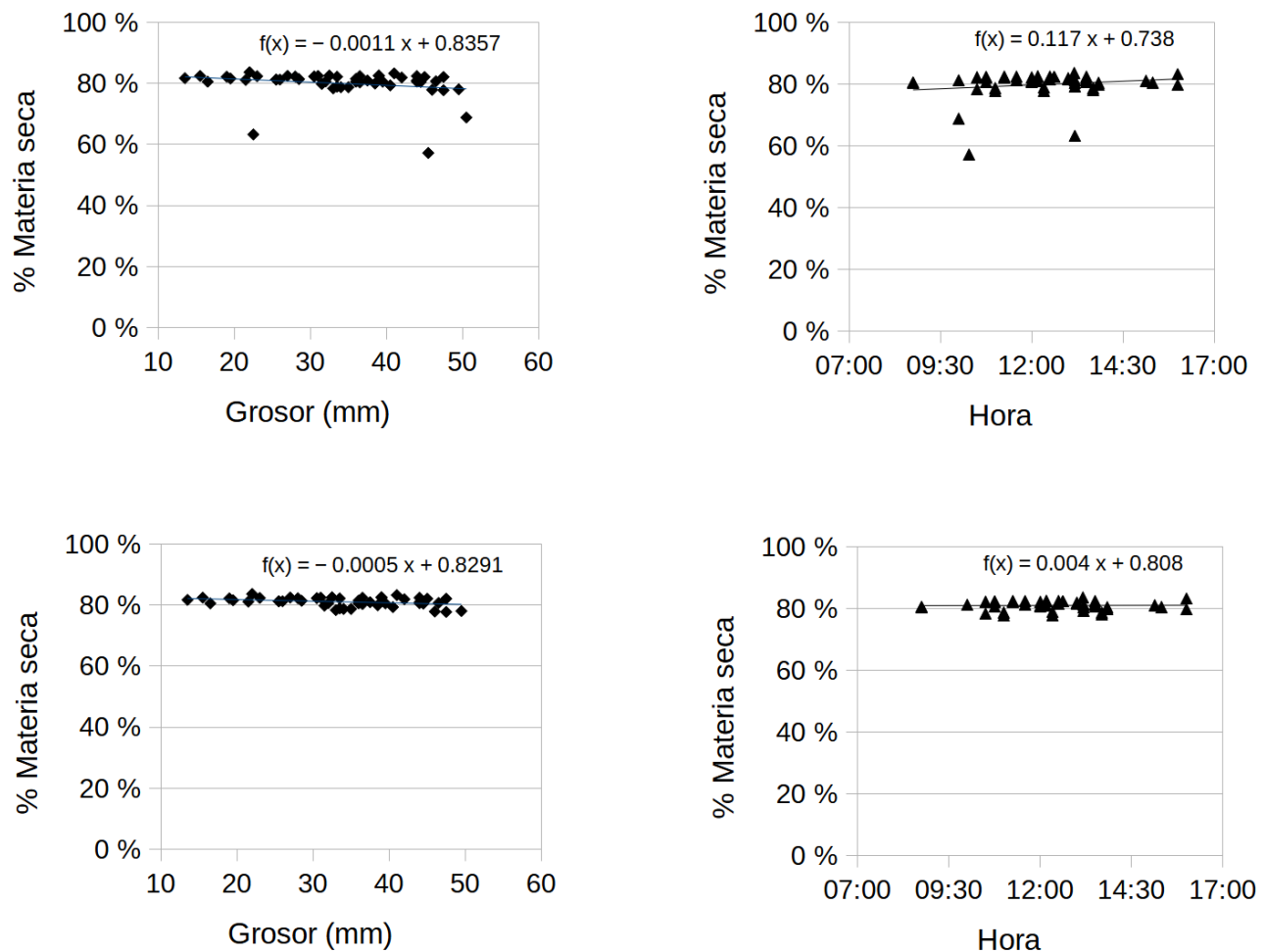


Figura 6. Efectos en la proporción de materia seca de la materia prima del grosor de la leña (izquierda) y la hora del día (derecha), para los datos completos (arriba) y habiendo eliminado tres *outliers* (abajo). Datos exclusivamente de leña de *Piptocoma discolor*.

Conclusiones

La preocupación que había de que podría ser difícil secar la materia prima suficientemente para evitar que haya emisiones excesivas de CH₄ ahora se ha disipado. Incluso se ha evidenciado que probablemente se podría fragmentar la materia prima mucho menos sin arriesgar que el secado sea insuficiente, y ello también implicaría una reducción considerable de las horas de trabajo y, consecuentemente, el costo por tonelada de C captado en el biocarbón. En suma, los resultados confirman que la elaboración de biocarbón en las chacras de la agricultura itinerante tiene una gran potencial como técnica para la eliminación de carbono de la atmósfera. Investigaciones adicionales previstas aclararán cómo la enmienda de biocarbón afecta los suelos y los cultivos netamente en la agricultura itinerante. Finalmente, es importante aclarar que el hecho de que se puede eliminar cierta cantidad de CO₂ de la atmósfera a través de la elaboración de biocarbón nunca debe ser utilizado como pretexto para seguir emitiendo CO₂. Muy a lo contrario, para parar el cambio climático global sigue siendo indispensable el rápidamente eliminar el uso de los combustibles fósiles. El biocarbón podrá servir únicamente para parcialmente remediar el daño al clima ya hecho por las emisiones de CO₂ a la atmósfera a causa del uso de combustibles fósiles.

Agradecimientos

Brayan Gualinga, Lorgio Gualinga, Majawali Gualinga, Nestor Gualinga, Pablo Gualinga, Ricardo Gualinga, Shingo Manyá, Frumen Santi, Stalin Shiguango y Tulio Viteri asistieron en el trabajo de campo junto con Carlos Aranda, Cesar Illanes y Bairon Gualinga quienes, además, pusieron sus chacras a disposición para la realización de los ensayos. El Consejo de Gobierno del Pueblo Originario Kichwa de Sarayaku (TAYJA-SARUTA) facilitó el trabajo de campo en su territorio. Dr. Rommel Montúfar y Dr. Álvaro Pérez pusieron a mi disposición las facilidades del laboratorio de genética poblacional y el herbario, respectivamente, de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, para la realización los análisis de las muestras de materia prima y de biocarbón.

Referencias bibliográficas

- Bravo, G. A., Pérez, R. D. A., Almeida, J. F., Morán, H. R., Andino, M., Roja, J. L. A., ... & Ibarra, E. M. (2019). Evaluación del uso de un biocarbón sobre la absorción de cadmio del suelo y la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(1), 6-15.
- Coomes OT, Miltner BC (2017) Indigenous charcoal and biochar production: potential for soil improvement under shifting cultivation systems. *Land Degrad Dev* 28(3):811–821.
- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2016). Emissions and char quality of flame-curtain" Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale charcoal/biochar production. *PloS one*, 11(5), e0154617.
- Cornelissen, G., Sørmo, E., de la Rosa, R. K. A., & Ladd, B. (2023). Flame curtain kilns produce biochar from dry biomass with minimal methane emissions. *Science of the Total Environment*, 903, 166547.
- Dolphin and Merkle (2024) – with minor processing by Our World in Data. "Average price on emissions covered by a carbon tax, weighted by the share of the country's CO₂ emissions" [dataset]. Resources for the Future, "Emissions-weighted Carbon Price" [original data].

- Fawzy S, Osman AI, Yang H, Doran J, Rooney DW (2021) Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. *Environ Chem Lett* 19:3023–3055
- International Biochar Initiative (2015) Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. *Int, Biochar Initiat*, p 23
- Islami T, Guritno B, Basuki N, Suryanto A (2011) Biochar for sustaining productivity of cassava based cropping systems in the degraded lands of East Java, Indonesia. *J Trop Agric* 49:40–46
- Ithaka Institute (2024). Standard for Carbon Sink Certification for artisan biochar production - version 2.1A.
- Jeffery S, Abalos D, Prodana M, Bastos AC, Van Groenigen JW, Hungate BA, Verheijen F (2017) Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environ Res Lett* 12(5):053001
- Jia GE, Shevliakova P, Artaxo N et al (2019) Land–climate interactions. In: Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner HO, Roberts DC, Zhai P, Slade R, Connors S, van Diemen R, Ferrat M, Haughey E, Luz S, Neogi S, Pathak M, Petzold J, Portugal Pereira J, Vyas P, Huntley E, Kissick K, Belkacemi M, Malley J (eds) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 11:403–427
- Lehmann J, Rondon M (2006) Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *Biol Approach Sustain Soil Syst* 113(517):e530
- Lenton TM (2010) The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration. *Carbon Management* 1(1):145–160
- Lenton TM (2014) The Global Potential for Carbon Dioxide Removal. In: Harrison RM, Hester RE (eds) *Geoengineering of the Climate System*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., pp 52–79. <https://doi.org/10.1039/9781782621225-00052>
- Liu Z, Deng Z, Davis S, Ciais P (2023) Monitoring global carbon emissions in 2022. *Nat Rev Earth Environ* 4(4):205–206
- Mertz O, Padoch C, Fox J, Cramb RA, Leisz SJ, Lam NT, Vien TD (2009) Swidden change in Southeast Asia: understanding causes and consequences. *Hum Ecol* 37:259–264
- Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Schmidt, H. P., & Cornelissen, G. (2017). Biochar from "Kon Tiki" flame curtain and other kilns: Effects of nutrient enrichment and kiln type on crop yield and soil chemistry. *PLoS One*, 12(4), e0176378.
- Puro.Earth (2025). *Biochar's Market Momentum: Leading the Carbon Removal Revolution Data as of June 11, 2025*. [<https://puro.earth/biochar>]

Ríos-Guayasamín PD, Smith SM, Thomas SC (2024) Biochar effects on NTFP-enriched secondary forest growth and soil properties in Amazonian Ecuador. *J Environ Manage* 350:119068

Sirén, A. H. (2024). The global potential for carbon removal through biochar in shifting cultivation systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(7), 75.

Valarezo, C., Villamagua, M. A., Mora, R. M., Maza, H., Wilcke, W., & Nieto, C. (2016). Respuesta del pachaco (*Schizolobium parahybum* Vell. Conc) y la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) a la aplicación de biocarbón y fertilización en el sur de la amazonia ecuatoriana. *Bosques Latitud Cero*, 6(1), 77-89.

Virú-Vasquez, P., Pilco-Nuñez, A., Tineo-Cordova, F., Madueño-Sulca, C. T., Quispe-Ojeda, T. C., Arroyo-Paz, A., ... & Nuñez-Bustamante, E. (2025). Integrated biochar–compost amendment for zea mays L. phytoremediation in soils contaminated with mining tailings of quiulacocha, Peru. *Plants*, 14(10), 1448.

Weng, Z. H., & Cowie, A. L. (2025). Estimates vary but credible evidence points to gigaton-scale climate change mitigation potential of biochar. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 259.

Wikipedia (2026). List of countries by minimum wage.

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_minimum_wage . Accedido el 2026-03-11.