

ELABORACIÓN DE BIOCARBÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PROVENIENTE DE LAS PODAS DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia*)¹

[ELABORATION OF BIOCHAR FOR THE USE OF RESIDUES FROM BAMBOO (*Guadua angustifolia*) PRUNES WASTES]

Gabriela Orozco Gutiérrez^{1§}, Rogelio Cesar de Lira Fuentes²

¹Investigadora Forestal del INIFAP Campo Experimental Tecomán, Colima. Km. 35 Carretera Colima-Manzanillo, C.P. 28100. ²Vicepresidente del Consejo Colimense del Bambú A.C. [§]Autor para correspondencia: (orozco.gabriela@inifap.gob.mx).

RESUMEN

El biocarbón (*biochar*) es un subproducto de la pirolisis de biomasa residual el cual ayuda a recuperar fertilidad y a secuestrar carbono. Los residuos sólidos, tales como hojas y ramas, subproductos del manejo y podas del bambú *Guadua angustifolia* representan 5 t ha⁻¹ año¹ en plantaciones forestales comerciales, estos, no generan valor. El objetivo fue elaborar biocarbón proveniente de residuos de bambú con la temperatura que genere el mejor rendimiento. El material fue secado al aire libre y fue pirolizado en un horno vertical. Se evaluó el rendimiento obtenido a cinco temperaturas: 350, 450, 550, 650 y 750°C. Se evaluaron 5 tratamientos con 3 repeticiones bajo un diseño de bloques completos al azar para un total de 15 unidades experimentales. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El producto que tuvo mayor rendimiento fue caracterizado determinando: cenizas, materia volátil y materia recalcitrante (carbono fijado). Hubo diferencia estadística significativa entre tratamientos sobre el rendimiento de carbón elaborado. El mejor rendimiento fue, del 27% a 558.3°C (550°C), y tiene 11.5% bajo contenido de material volátil, 8.5% de cenizas y 72% de carbono fijado.

Palabras clave: Biochar, fertilización, pirolisis, suelo.

ABSTRACT

Biocarbon (*biochar*) is a bio product of the pyrolysis of residual biomass which helps to recover fertility and sequester carbon. Solid waste, such as leaves and branches, management by-products and pruning of *Guadua angustifolia* bamboo represents 5 t ha⁻¹ year⁻¹ in commercial forest plantations, these do not generate value. The objective was to produce biocarbon from bamboo waste with the temperature that generates the best performance. The material was dried in the open air and pyrolyzed in a vertical oven. The yield obtained at five temperatures was evaluated: 350, 450, 550, 650 and 750°C. Five treatments with 3 repetitions were evaluated under a randomized complete block design for a total of 15 experimental units. An analysis of variance and a Tukey test ($\alpha = 0.05$) were performed. The product that had the highest yield was characterized by determining: ashes, volatile matter and recalcitrant matter (fixed carbon). There

¹ Recibido: 26-abril-2019
Aceptado: 25-mayo-2020

was a statistically significant difference between treatments on the yield of processed coal. The best yield was 27% at 558.3°C (550°C), and it has 11.5% low volatile material content, 8.5% ash and 72% fixed carbon.

Index words: Biochar, fertilization, pyrolysis, soil.

INTRODUCCIÓN

La pérdida de la fertilidad y la degradación de los suelos en México, es un fenómeno que va en aumento por el cambio climático que perturba la producción de alimentos y la conservación de los bosques; además afecta la disponibilidad de agua causada por sequías extremas o lluvias torrenciales, temperaturas muy altas o muy bajas (Sánchez *et al.*, 2011).

Las deficiencias nutrimentales y de materia orgánica generadas por la pérdida de la fertilidad, reduce no solo la calidad del suelo, sino también los rendimientos que pueden alcanzar los agroecosistemas. Normalmente, este problema es frecuentemente subsanado con aplicaciones de fertilizantes inorgánicos. Sin embargo, si se usan indiscriminadamente (hiperfertilización) pueden provocar contaminación de los cuerpos de agua y degradación en el suelo. Son muy pocos aún los agricultores que usan abonos orgánicos (Fortis *et al.*, 2007). El empleo de nuevas tecnologías como el uso de biofertilizantes, microorganismos y fertilizantes minerales para mejorar la fertilidad del suelo, podría verse apoyada por el empleo del biocarbón (Yamoah *et al.*, 2002).

Existen reportes que indican que el biocarbón puede retener temporalmente nitrógeno soluble en su estructura y liberarlo más lentamente que los productos inorgánicos, incrementando así la eficiencia de este elemento y la productividad de los cultivos (Zheng *et al.*, 2013). Dado que el “biochar” es una excelente enmienda en la recuperación de suelos ácidos y degradados, característicos de los trópicos con poca producción, su uso mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo permitiendo mayor productividad y mejorar la caldiad del suelo (Escalante *et al.*, 2016). The International Biochar Initiative o IBI (2012), define al biochar (biocarbón) como un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa, en un ambiente limitado de oxígeno, transformando los residuos sólidos orgánicos en un carbón fijo.

Aunque la producción de biocarbón y su aplicación al suelo es una tecnología empleada en diferentes partes del mundo (Lehman y Joseph, 2009; Major, 2010; Steiner *et al.*, 2010; Van Zwieten *et al.*, 2010), en México hay poca información disponible acerca de este producto. El biocarbón es un producto que puede ser obtenido sólo donde hay suficiente biomasa disponible, tal es el caso de los subproductos de actividades agroforestales o residuos orgánicos urbanos, que pueden ser usados como materia prima. Castañeda (2016) considera que entre las fuentes se sitúan los restos de poda, que ha sido estudiado en los últimos años como materia prima para la fabricación de biocarbones. Escalante *et al.*, (2016) indica que entre los materiales más utilizados son los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, entre otros.

El bambú constituye una alternativa sustentable de la madera, ya que requiere únicamente 5 años para ser aprovechado (aprovechamiento de recursos forestales maderables 20-40 años). El bambú es la materia prima para la elaboración de múltiples productos como: artesanías, muebles, estructuras, carbón vegetal y latillas, entre otros. Durante el proceso de aprovechamiento de culmos (tallos) de bambú dentro de una plantación forestal comercial, se generan residuos sólidos los cuales pueden ser aprovechados para elaborar biochar. En este contexto, se elaboró biocarbón

aprovechando los residuos de las podas de una plantación comercial de bambú *Guadua angustifolia* evaluando sus propiedades fisicoquímicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de material y ubicación de la plantación

El material recolectado fue de las ramas de bambú que fueron cortadas durante la poda habitual de una plantación forestal comercial de la especie *Guadua angustifolia*, ubicada en El Remudadero, Municipio de Comala, Colima. Donde fueron seleccionados al azar cinco tramos de 5 cepas diferentes, cortadas de la misma forma con ayuda de un machete o sierra de dientes de tiburón incluyendo ramas laterales y espinas. De cada rama se separaron por tejidos: ramas laterales primarias y ramas laterales secundarias. A este material se le realizaron cortes de aproximadamente 20-30 cm e inmediatamente después se prepararon las cinco tandas para los cinco tratamientos a realizarse, distribuyéndose equitativamente. Se contabilizó el número de trozos que pudiesen llenar el horno vertical para cada tratamiento, se determinó la humedad y se fijó un tiempo de residencia (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de las variables registradas en el proceso de corte, preparación y pirolisis.

Número de quema	Número de ramas primarias	Número de ramas secundarias	Contenido de humedad (%)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
1	50	20	35± 2.7a	3	350
2	50	20	32±2.5a	3	450
3	50	20	33±2.8a	3	550
4	50	20	34±3.2a	3	650
5	50	20	34±2.8a	3	750

Porcentaje de diversas propiedades físicas del carbón (promedio ± error estándar). Las letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Control de secado, humedad de la materia prima y características del horno

La materia prima fue secada al sol a temperatura ambiente, hasta tener una humedad < 20%. Para realizar esta medición, se utilizó un medidor de humedad manual para madera marca Benetech y la temperatura fue medida con termómetro.

El carbón se elaboró en un horno pirolítico tipo reactor vertical de doble barril, uno de acero de 200 L y uno de 50 L de acero inoxidable. Este horno fue diseñado para la producción en lotes de pequeñas cantidades con fines de investigación y análisis. Ambos con tapas, dejando una compuerta para la alimentación con leña de bambú y una salida de los gases procedentes de la pirolisis (syngas).

Proceso de pirolisis lenta

La pirolisis fue lenta o convencional en ausencia de oxígeno. El horno se dividió en dos niveles a partir de los orificios de entrada de aire y salida de humo. En cada uno se colocaron la misma

cantidad de material que se identificaron con clavos para comparar la calidad por nivel del horno.

Se evaluó el rendimiento obtenido a cinco temperaturas: 350, 450, 550, 650 y 750°C. Se evaluaron 5 tratamientos con 3 repeticiones bajo un diseño de bloques completos al azar dando un total de 15 unidades experimentales. Para identificar los tratamientos con diferencia significativa se realizó una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El proceso de carbonización se realizó en tres ocasiones con una duración de 150 h., se registró la temperatura máxima alcanzada en las quemaduras con un termómetro infrarrojo.

Rendimiento y propiedades fisicoquímicas

El rendimiento (kg) se determinó relacionando el peso del biochar (kg) de cada muestra entre el peso de la biomasa seca (kg) por 100. Para la caracterización del biocarbón, se consideró la determinación de los siguientes parámetros: porcentaje de humedad, ceniza, materia volátil y materia residente o recalcitrante (carbono fijado). Para evaluar las propiedades fisicoquímicas se usó la norma internacional ASTM D 1762 – 84 (ASTM, 2001) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ecuaciones utilizadas para determinar el rendimiento y propiedades físicas del biocarbón de bambú

Variable	Formula	Clave
Rendimiento (R)	$R = \frac{P}{P_s} * 100$	P= Peso del biochar (kg) Ps= Peso de la biomasa seca (kg)
Contenido de humedad (CH)	$CH = \frac{A - B}{B - C} * 100$	A= Masa inicial de la muestra molida (g) B= Masa después de 105°C (g) C= Masa después de 950°C (g)
Material volátil (MV)	$MV = \frac{B - C}{D} * 100$	D= Masa del residuo (g) CH= Contenido de humedad (%)
Contenido de Cenizas (CC)	$CC = \frac{D}{B} * 100$	MV= Material volátil (%) CC= Contenido de Cenizas (%)
Carbón fijo (CF)	$CF = 100 - C - MV - CC$	CF= Carbón fijo MV=Material volátil

Contenido de humedad: Se partió de 1.5 g del carbón molido y cribado con un tamaño de partícula de 425 µm. La muestra se colocó en una estufa ARSA® durante dos horas a 105° C.

Material volátil: Se colocó la muestra de carbón libre de humedad en una mufla CAISA ® a 950° C. El porcentaje del material volátil se estimó por diferencia de peso entre la masa del carbón anhidro y la masa de la muestra después de exponerla a 950° C. Contenido de cenizas: la muestra libre de humedad y material volátil se sometió a 750° C en la mufla durante siete horas, posteriormente se enfrió y pesó. Carbón fijo: Se estimó al restar el contenido de humedad, material volátil y cenizas a la masa del carbón molido y tamizado (Márquez-Montesino *et al.*, 2001).

Los datos porcentuales del contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo se transformaron por medio de la función raíz cuadrada del arco seno de p , donde: p = a la proporción de la variable dependiente (Scheffler, 1981). Posteriormente, se realizaron pruebas de

normalidad de los datos para cada variable, mediante la prueba Kolmogorov–Smirnov. Fueron analizados por el programa estadístico SAS/ETS® (SAS, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento

El tratamiento con mayor rendimiento de biochar fue en un rango de temperatura de 550 a 558.3°C. Escalante *et al.* (2016) indican que para biochar destinado al uso agrícola como necesario que las temperaturas sean inferiores a los 700° C, esto, lo hace diferente al carbón activado o al carbón usado como combustible. Los resultados obtenidos son característicos para altas temperaturas de 550°C, tal como lo reportan Milesi *et al.* (2016); confirmándose que la temperatura es un factor importante en las características del biochar y en consecuencia en la estabilidad del biochar (Demirbas, 2004). El análisis de varianza del rendimiento mostró diferencias significativas ($p<0.01$) entre temperaturas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de varianza del rendimiento ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$) del biocarbón de *G. angustifolia* producido.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor de <i>F</i>	Valor de <i>p</i>
Temperatura (T)	2	2.878	8.82	0.0042
Nivel (N)	2	0.3322	1.02	0.3141
Temperatura×Nivel (TN)	2	0.0053	0.02	0.8872
Error	54	0.321		
Total	56			

Propiedades fisicoquímicas

El contenido de humedad del bambú debe ser bajo para realizar un encendido rápido y obtener buenos rendimientos de producción de biochar. Así mismo, para que no se generen humos negros por la mala combustión producida, por lo que la humedad del material debe estar entre 4.5 a 17 % de humedad. Velázquez-Trujillo *et al.* (2010) iniciaron la carbonización con una humedad de 6.9 % sin tener problemas para el proceso, por lo que el rango sugerido permite una adecuada carbonización. El mejor rendimiento fue del 27%, el cual tiene 11.5% de bajo contenido de material volátil, 8.5% de cenizas y 72% de carbono fijado (Cuadro 4). Este resultado es mejor que lo encontrado para *Bambusa vulgaris striata* por Velázquez-Trujillo *et al.* (2010) quienes reportaron un rendimiento del 25%, mientras que Choy *et al.* (2015) obtuvieron el 22.5 % de rendimiento.

Respecto al contenido de humedad (CH), materia volátil (MV) y carbón fijo (CF), contenido de cenizas (CC) no presentaron diferencias significativas ($p<0.05$) entre las temperaturas. Un bajo contenido de carbón fijo aumenta la friabilidad y fragilidad, y disminuye la resistencia a la compresión y cohesión (Demirbas, 2003). El contenido de carbón fijo (72%) es debido a su alta estabilidad, por consiguiente, bajo contenido de material volátil (11.5%), muy parecido a lo obtenido por Velázquez-Trujillo *et al.*, 2010 quienes obtuvieron un 35% de rendimiento. Existen evidencias que al aplicar biocarbón al suelo, debido a que existe evidencia que se precipita dentro

del mismo, proveyendo una fuente de carbono altamente soluble que podría causar deficiencia de nutrimentos a corto plazo, ya que estimularía el crecimiento de microorganismos que compiten con la planta por nitrógeno disponible, aunque esta sustancia volátil desaparece generalmente de una estación de crecimiento a otra, sin contribuir a mejorar las propiedades del suelo a largo plazo (Mc Laughlin *et al.*, 2009).

Cuadro 4. Propiedades fisicoquímicas del biocarbón obtenido de bambú *Guadua angustifolia*.

Temperatura ° C	Rendimiento (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)	Humedad (%)
350	10	10.5±4.0a	8.2±0.5a	63.5±2.4a	4.4±0.3a
450	25	11.2±4.1a	8.1±0.6a	65.3±3.1a	4.3±0.2a
550	27	11.5±3.8a	8.5 ±0.7a	72±3.8b	4.5±0.3a
650	23	10.9±3.7a	8.4±0.4a	70.2±3.9b	4.2±0.5a
750	20	10.2±4.1a	8.2±0.6a	69.3±3.8b	4.5±0.1a

Porcentaje de diversas propiedades físicas del carbón (promedio ± error estándar). Las letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

El contenido de material volátil es usado como medida de la susceptibilidad del biocarbón a degradarse, así mismo (Escalante *et al.* 2016) indica que a mayor contenido de material volátil es mayor la repelencia del biocarbón al agua. La importancia de presentar valores bajos de contenido de cenizas, es para evitar que los reactores se saturen obstruyendo el flujo de los gases de combustión en los intercambiadores de calor (Werkelin *et al.*, 2011). Mientras que un contenido de carbón fijo bajo, aumenta la posibilidad de rompimiento porque incrementa la friabilidad y fragilidad; y por ende disminuye la resistencia a la compresión (Demirbas, 2003).

Novak *et al.* (2010) indican que el 58% de carbono se encuentra formando parte de estructuras aromáticas altamente condensadas, presentándose en menor cantidad las formas alifáticas (29%) y carboxílica (13%), lo cual no alteraría la biodisponibilidad de carbono en el suelo.

Los biocarbones provenientes de material vegetal con altos contenidos de celulosa, como el bambú, obtenidos a temperaturas entre 250 y 350 °C, tienen una pérdida de masa considerable en forma volátil, dejando como producto final una estructura rígida de carbono amorfo. Por lo que tiene coherencia, que el mayor rendimiento sea a temperaturas mayores. Existe una relación directamente proporcional entre el aumento de la temperatura en la pirolisis y el incremento de la volatilización (Baldock y Smernik, 2002; Demirbas, 2004). En el caso del bambú cuando se encuentran sus tallos maduros, se debe a que esta disposición y organización de las fibras de celulosa en la pared secundaria y la fuerte lignificación de los tejidos de las especies leñosas, hace que presenten una estabilidad térmica elevada (Maya *et al.*, 2017).

La temperatura es fundamental para determinar diferentes propiedades fisicoquímicas del carbón de bambú. Por ejemplo, los biocarbones elaborados por medio de pirolisis a temperaturas bajas, pueden contener compuestos orgánicos que pueden ayudar a la nutrición vegetal. Sin embargo, se han encontrado que contienen bajos niveles de absorción, y por el contrario, existe una mejor capacidad de absorción en materiales carbonizados producidos a temperaturas mucho más altas (Gundale y De Luca, 2006).

Ayahn, (2000), Mohan *et al.* (2006) y Cedeño-Valdiviezo e Irigoyen- Castillo (2011) mencionan que el bambú *Guadua* es un buen candidato como precursor para producir carbón, debido a su bajo costo de producción y alta tasa de reposición; teniendo en cuenta que gran parte de esta importante materia prima, queda como desecho (Prías-Barragán *et al.*, 2011). El bambú *Guadua* es un material ligno celulósico, que implica una serie de reacciones tales como despolimerización, craqueo y deshidratación de lignina y celulosa, en la que se retira la materia volátil liberando elementos (principalmente hidrógeno y oxígeno) en forma de alquitranes, quedando un esqueleto carbonoso con porosidad incipiente (Navarrete *et al.*, 2005).

El carbón vegetal tiene la capacidad de atraer en su superficie moléculas de gases (adsorción) y presenta valores máximos de superficie específica no mayores a los 2 m g⁻¹ de carbón. Las partículas de carbón tienen, en su estructura interna, una gran cantidad de cavidades o intersticios que alojan el material volátil (sustancias alquitranadas) que se forma durante la carbonización; estas áreas tienen baja capacidad de adsorción. Con la activación, el material volátil es eliminado por arrastre, dejando los intersticios libres, con el consiguiente aumento de la superficie específica que puede llegar a valores cercanos a los 2 000 m g⁻¹ (Gonzales, 2002).

CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias estadísticas significativas para el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de carbón elaborado. El mejor rendimiento fue del 27% a 558.3°C (550°C), el cual presentó bajo contenido de material volátil (11.5%), de cenizas (8.5%) y de carbono fijado (72%). La calidad del biocarbón, en términos fisicoquímicos, se encuentra dentro de los intervalos establecidos para un biocarbón de calidad, establecidos por International Biochar Initiative. La calidad del carbón puede incrementar, si se consideran aspectos operativos durante el proceso de carbonización, como elevar la temperatura para reducir el porcentaje de material volátil y aumentar el carbón fijo; sin embargo, se reduciría el rendimiento.

LITERATURA CITADA

- Ayahn, D. 2000. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion & Management* 42: 1357-1378. DOI: 10.1016/S0196-8904(00)00137-0
- Baldock, J. A. and R. J. Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33: 1093-1109. DOI: 10.1016/S0146-6380(02)00062-1
- Castañeda, W. 2016. Mejora de la gestión de la fracción vegetal municipal. V Congreso de residuos sólidos en el Perú. Logística, reciclaje, reúso, tratamiento y disposición final Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. pp. 23-24.
- Cedeño-Valdiviezo, A. E y J. Irigoyen-Castillo. 2011. El bambú en México. *Usjt. Arq. Urb.*, 6:223-243. Fecha de consulta 08/agosto/2019. Disponible en: https://www.usjt.br/arq.urb/numero_06/arqurb6_06_ponto_de_vista_03_alberto_cedeno.pdf
- Choy, K., J. Barford and G. McKay. 2005. Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste-process design, evaluation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Journal* 109: 147-165. DOI: 10.1016/j.cej.2005.02.030
- Demirbas, A. 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management* 44(9):1465-1479.

- Demirbas, A. 2004. Bioenergy, global warming, and environmental impacts. *Energy Sources* 26(3): 225-236. DOI: 10.1080/00908310490256581
- Escalante, A. M., G. Pérez., C. Hidalgo, J. López, J. Campo, E. Valtierra y J. D. Etchevers. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo*. México. *Terra Latinoamericana* 34(3):367-382.
- Fortis, H., E. Salazar, I. Orono, J. Leos, J. Cruz, J. A. Montemayor, J. A. García y R. A. Aldaco. 2007. Estadísticas de la producción orgánica. pp. 1-33. *In*: E. Salazar S., H. I. Trejo E., I. Orona C., C. Vázquez V., J. D. López M., M. Fortis H., A. Flores H., F. J. Sánchez R., J. A. Léos R. y F. Jiménez D. (eds.). *Uso y aprovechamiento de abonos orgánicos e inocuidad*. FAZ- UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED. Gómez Palacio, Durango, México
- Gonzales, M.H.E. 2002. Estudio de carbonización y sus productos de 02 especies de "paca" (*Guadua angustifolia* y *Guadua sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, Madre de Dios. Monografía. Sección Transformación Química, Dpto. Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima Perú. Disponible en: https://www.academia.edu/8052385/ESTUDIO_DE_CARBONIZACION_DE_02_ESPECIES_DE_PACA_Guadua_angustifolia_y_Guadua_sarcocarpa_PROVENIENTES_DE_LA_ZONA_DE_IBERIA-TAHUAMANU_MADRE_DE_DIOS
- Gundale, M. J. and T. H. DeLuca. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management* 231(3): 86-93. DOI:10.1016/j.foreco.2006.05.004
- International Biochar Initiative (IBI). 2014. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. (Consultado: 25/04/2019). Disponible en: http://www.biochar-international.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V2%200_nal_2014.pdf.
- Lehmann, J and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan. UK-USA. (Consultado: 25/04/2019). Disponible en: https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/Biochar_book_Chapter_1.pdf
- Major, J. 2010. Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems. International Biochar Initiative. (Consultado: 25/04/2019). Disponible en: <https://biochar-international.org/>
- Maya, J.M., J.C. Camargo y O. Marino. 2017. Características de los culmos de guadua de acuerdo al sitio y su estado de madurez. *Colombia Forestal* 20(2): 171-180. DOI:10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a06
- McLaughlin, H., P. S. Anderson, F. E. Shields and T. B. Reed. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. North American Biochar Conference. Boulder, CO. (Consultado: 25/04/2019). Disponible en: <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/AllBiochars--Version2--Oct 2009.pdf>.
- Milesi, L., C. Branco, A. Irizar y A. Andriulo. 2016. Caracterización de biochar producidos a partir de *Miscanthus x giganteus* y *Aspidosperma quebracho-blanco*. XXX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo". Rio de Janeiro, Brasil.
- Mohan, D., C. Pitman and P. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/Biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels* 20: 848-88. DOI: 10.1021/ef0502397
- Navarrete, L., L. Giraldo, M. Baquero y J. Moreno. 2005. Carbón activado: efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. Bogotá, CO. *Revista Colombiana de Química* 34(1):67-78.

- Novak, J. M., I. Lima, B. Xing, J. W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, D.W. Watts, W. J. Busscher, and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3:195- 206.
- Prías-Barragán J. J., C. A. Rojas-González, N. A. Echeverry-Montoya. G. Fonthal y H. Ariza-Calderón. 2011. Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 35(135): 157-166.
- Sánchez, S., M. Hernández y F. Ruz. 2011. Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos Forrajes* 34: 375-392.
- Scheffler, W. C. 1981. *Bioestadística*. Fondo Educativo Interamericano. México. D.F. México. 267 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2004. SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Institute. Raleigh, NC. USA. 5136 p.
- Steiner, C., K. C. Das, N. Melear and D. Lakely. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality* 39:1236-1242.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plan Soil* 327: 235-246. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x
- Velázquez-Trujillo, A., E. Bolaños-Reynoso y Y.S. Pliego- Bravo. 2010. Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 9(3): 359-366
- Werkelin, J., D. Lindberg, D. Boström, B. J. Skrifvars and M. Hupa. 2011. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy* 35(1): 725-733.
- Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro and S. Koala. 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Field Crops Research* 75: 53-62. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00008-4
- Zheng, H., Z. Wang, X. Deng, S. Herbert and B. Xiang. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206: 32-39. DOI:10.1016/j.geoderma.2013.04.018