




Análisis de estabilidad de biochar de residuos agroforestales

Stability analysis of biochar from agroforestry pruning

Rosario Palacios-Hugo ^{1,2}, José Calle-Maravi ^{1,3}, Mary Flor Césare-Coral ^{1,4}.

¹Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. ² ✉ 20131065@lamolina.edu.pe; ³ ✉ jcalles@lamolina.edu.pe; ⁴ ✉ mcesare@lamolina.edu.pe



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.94948>

2022 | 71-4 p 377-387 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2021-04-08 Acep.: 2023-02-17

Resumen

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica en el que se obtiene biochar, que es un componente enriquecido en carbono. La diferencia entre el carbono vegetal y el biochar es que este es exclusivamente una enmienda de suelo y permite el manejo de residuos sólidos lignocelulósicos. Asimismo, el biochar es considerado una alternativa para fijar carbono de la atmósfera en el suelo; por ello, esta investigación evaluó la estabilidad del biochar obtenido a través de la pirólisis a 300 °C y 500 °C de los residuos de podas de las cinco especies forestales de mayor abundancia en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú. La investigación evaluó la estabilidad del biochar en función al grado de estabilidad y la prueba estandarizada de AT_4 . Respecto al grado de estabilidad, este se incrementa al elevarse la temperatura de pirólisis de 300°C a 500°C en una razón de 0.102, asimismo, el carbono lábil disminuye en 5.21 %, el carbono oxidable en 13.66 %, mientras que el carbono recalcitrante se incrementa en 10.90 %. En cuanto a la prueba respirométrica, se observó un comportamiento similar, dado que se encontró mayor descomposición en el carbono que tendría menor grado de estabilidad, variando el índice AT_4 en 2.74. Respecto a las especies, de acuerdo con el grado de estabilidad y AT_4 , el más estable fue el biochar de Molle a 500 °C.

Palabras claves: biomasa, energías limpias, enmienda, pirólisis, reactividad.

Abstract

Pyrolysis is a thermal decomposition process through which biochar is obtained, which is a component enriched in carbon. The difference between vegetal carbon and biochar is that the latter is exclusively a soil amendment that allows the management of lignocellulosic wastes. Likewise, biochar is considered an alternative to fix carbon from the atmosphere in the soil. This research evaluated the stability of biochar obtained through pyrolysis at 300 °C and 500 °C from the pruning waste of the five most abundant forest species from the National Agrarian University - La Molina (UNALM), Lima, Perú. This investigation evaluated the stability of the biochar based on the degree of stability and the standardized AT_4 test. Regarding the degree of stability, it increased in a ratio of 0.102 when the pyrolysis temperature raised from 300 °C to 500 °C, likewise, the labile carbon decreased by 5.21 %, the oxidizable carbon by 13.66 %, while the recalcitrant carbon increased by 10.90 %. Regarding the spirometry test, a similar behavior was observed, since greater decomposition in the carbon that would have a lower degree of stability was noticed, varying the AT_4 index by 2.74. Regarding the species, according to the degree of stability and the AT_4 , the most stable biochar was that of Molle 500 °C.

Keywords: biomass, clean energy, amendment, pyrolysis, reactivity.

Introducción

Los incendios registrados en la Universidad Nacional Agraria la Molina La Republica (2017) producto de la acumulación de residuos de podas agroforestales constituyen un grave problema ambiental por la liberación de gases de efecto invernadero (GEI) y, además, la institución ha sido sancionada con multas municipales con base en el Reglamento de Fiscalización y Control Administrativo de la Municipalidad la Molina (RFCA), Cuadro de Infracciones y Sanciones Administrativas (CISA) - Ordenanza 305 (2015). Por ello, actualmente se evalúa la pirólisis como alternativa de manejo de residuos lignocelulósicos, puesto que mediante este proceso se obtiene biochar, el cual, además de servir como una enmienda de suelo, permite la mitigación de GEI fijando el carbono del ambiente en el suelo. Cabe mencionar que, International Biochar Initiative (IBI) (2015) estima que un 80 % de biochar duraría más de 100 años.

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición térmica en ausencia de oxígeno, por lo que se limita la oxidación de los componentes (Lehmann y Joseph, 2009). Así Ospina-Guarín *et al.* (2014) indican que a 90 °C se inicia la primera fase de la descomposición de la biomasa, la segunda fase ocurre a los 200 °C, en los que se descompone la hemicelulosa (200 a 260 °C) y se emite CO₂; la celulosa se descompone entre 240 - 350 °C y emite CO; por su parte, la lignina se descompone entre 280 - 500 °C y libera CH₄, H₂ y compuestos volátiles, como alcoholes, ácidos, fenoles, entre otros. Además, a 600 °C la mayor parte del material se ha descompuesto, y deja como residuo carbono fijo, que corresponde a la organización del material carbonoso no volátil (biochar).

El biochar en su estructura sólida fija carbono, y su materia prima es la biomasa residual, como madera, hojas, estiércol, entre otros (Lehmann y Joseph, 2009). Dado que el biochar está constituido por carbono, la diferencia de este con el carbono vegetal es que es usado como enmienda de suelo. Cabe mencionar que también es considerado un combustible ecológico, dado que, debido a su lenta descomposición, permite fijar el carbono y mitigar la emisión de CO₂, CH₄, CO y otros (IBI, 2015).

Los factores del proceso que determinan la estabilidad del biochar son cuatro. En primer lugar, está la temperatura: si bien el rendimiento porcentual disminuye conforme se incrementa la temperatura, también se incrementa la estabilidad, dado que se favorece una mayor volatilización de los compuestos ligeros y la complejación de la estructura (Cheng *et al.*, 2021). El segundo lugar en los factores del proceso lo ocupa el tiempo de residencia: a mayor tiempo del proceso el vapor y la parte sólida permanecerán juntos permitiendo una mayor proliferación de la estructura (Wang *et al.*, 2020). En tercer lugar, se encuentra la velocidad de calentamiento, puesto que un incremento abrupto de temperatura genera

una estructura que no ha permitido su proliferación aromática (Palacios, 2020). Finalmente, y en cuarto lugar, está la presión: a mayor presión se genera más contacto entre el vapor separado y la estructura sólida, el cual es reabsorbido y forma una estructura más compleja y estable (Lehmann y Joseph, 2009).

Asimismo, un factor diferente al proceso, pero también determinante, es la materia prima, en este caso la biomasa, dado que su composición de celulosa, hemicelulosa y lignina contiene estructuras de niveles de complejidad diferentes entre ellos, por lo que en el proceso de pirólisis la pared celular comienza destruyéndose para luego dar paso a la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa, lo que genera un carbono amorfo no estable. En este punto de descomposición la degradación de la lignina aromata la estructura permitiendo la formación de una estructura estable (Li *et al.*, 2021).

Si bien el biochar puede tener residuos forestales como materia prima, gras o excrementos de animales, se ha demostrado que el más estable sería el producido a partir de residuos de forestales o lignocelulósicos; esto se debe a su contenido proporcional de celulosa, hemicelulosa y lignina, dado que esta se descompone en función de la complejidad de su estructura y formará una estructura de anillos aromáticos (Wang, Xiong y Kuzyakov, 2016).

Por lo tanto, en esta investigación se propuso analizar la estabilidad del producto sólido de la pirólisis que se dio a partir de las podas de las cinco especies forestales de mayor predominancia en el campus de la UNALM, a través de dos temperaturas de pirólisis (300 °C y 500 °C). Esta evaluación se realizó a través de la descomposición en carbono lábil, carbono inoxidable y carbono recalcitrante, lo que permitió evaluar la estabilidad; además, se realizó la prueba respirométrica. Ambas pruebas se realizaron con el fin de evaluar los componentes del biochar y su descomposición.

Materiales y métodos

El enfoque de esta investigación se dio a nivel cuantitativo y es de alcance exploratorio. Los ensayos realizados para la evaluación de la estabilidad se realizaron en las instalaciones del laboratorio de Energías Renovables, Unidad de Biomasa Energética de la UNALM.

Especies

Con base en el inventario de especies forestales de la UNALM, para la presente investigación se recolectaron las 5 especies predominantes en el campus universitario que representan el 42 % del total de individuos. Estas especies son *Grevillea robusta*, *Schinus molle*, *Casuarina cunninghamiana*, *Ficus benjamina* y *Eucalyptus spp.* Las especies seleccionadas y el número de individuos identificados en el campus se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especies seleccionadas por su abundancia en el campus de la UNALM

Nombre común	Nombre científico	Familia	Número de individuos	Porcentaje
Grevilea	<i>Grevillea robusta</i>	Proteaseae	198	10.77
Molle Serrano	<i>Schinus molle</i>	Anacardiaceae	177	9.63
Casuarina	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Casuarinaceae	144	7.83
Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	Moraceae	132	7.18
Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	Myrtaceae	126	6.86
	Otros		1061	57.73
	Total		1838	100.00

Recolección

De las especies seleccionadas se identificaron 5 individuos de cada una en las zonas de mayor predominancia dentro del campus y se realizó una poda de mantenimiento para caracterizar de manera general la especie. Para recolectar una muestra significativa se dividió el dosel en 8 cuadrantes medios, seleccionando de estos 2 cuadrantes medios que se encontraran en posiciones opuestas. Las muestras recolectadas fueron llevadas a estufa a 105 °C por 24 horas, con el fin de disminuir la humedad de los residuos colectados y uniformizar la humedad entre las diferentes especies.

Producción de biochar - Rendimiento

El biochar se produjo en un horno pirolítico, pues este horno permite una descomposición térmica en ausencia de oxígeno; además, mediante una purga de gases se elimina la parte gaseosa del proceso y mediante el conducto de recuperación de gases se eliminan los compuestos en forma líquida.

El otro factor evaluado en esta investigación, a parte de la materia prima, fue la temperatura, con el fin de observar si hay cambios en su comportamiento. Por ello, se realizó el proceso pirolítico a 300 °C y 500 °C por 5 horas aproximadamente. Para que el tratamiento fuera el mismo en cada especie, se separaron 500 gr de cada especie en recipientes resistentes al calor y se colocaron en un horno de capacidad de 200 L. Pasadas las 5 horas, se procedió a determinar el rendimiento de la producción del biochar por tipo de especie.

Caracterización química

Se realizó la caracterización química tanto de la materia prima como del biochar. Las muestras fueron acondicionadas mediante secado y molido. El secado se realizó por 24 horas a 105 °C, luego

fueron enfriadas en un desecador, finalmente fueron molidas y tamizadas con tamiz N°20. A partir de esto, se realizaron los siguientes análisis:

Análisis elemental (C, H, O, N): se usó la metodología (ASTM D 5373 - 16), tal como lo indica el manual del equipo Instrument CHN628; se requiere que la muestra sea secada previamente al análisis.

Análisis termo-gravimétrico (TGA) (proximal: % H, %MV, %ceniza): se realizó con el equipo LECO TGA701, el cual emplea la metodología (ASTM D7582 - 15), como es establecido en el manual del equipo TGA Q600; la muestra debe encontrarse en base húmeda. Se usó una termobalanza TA Instrument TGA Q600.

Análisis de poder calorífico (calorímetro): se realizó mediante un calorímetro LECO AC600, con una combustión en atmósfera de oxígeno seco. Se requirió 0.4 g de masa de muestra sólida en base seca. El poder calorífico se realizó de acuerdo con la norma ASTM D5865 - 07 indicada en el manual del equipo LECO AC600.

Estabilidad del biochar

Para la determinación de la estabilidad de biochar se compararon dos metodologías: la primera se sustenta en la descomposición del biochar en los componentes de carbono lábil, carbono oxidable y el carbono recalcitrante. La segunda metodología consiste en la prueba de respirometría AT₄, ambas metodologías serán comparadas para analizar la estabilidad del producto. El primer método consistió en la descomposición del biochar en función a la estabilidad de los componentes, los cuales fueron: el carbono oxidable soluble (lábil), carbono oxidable y carbono recalcitrante. El carbono oxidable se determinó mediante el método de determinación de carbono orgánico oxidado con K₂Cr₂O₇ por espectrofotometría (Li *et al.*, 2021). El carbono oxidable se determinó por el método de Walkley Black, y el carbono recalcitrante se determinó por el método de Klasson modificado (López *et al.*, 2010).

Además, para evaluar el grado de estabilidad se determinó el carbono orgánico de manera indirecta, es decir, se calculó la diferencia del carbono total, determinado a través de la prueba estandarizada ASTM D5373 de LECO Corporation (2013), y el carbono inorgánico fue calculado por una titulación de carbonatos con HCL 1N.

Con los datos obtenidos se utilizó el indicador de Grado de Estabilidad propuesto por López *et al.* (2010), que es una modificación del método de Klasson. De esta manera, fue calculado el grado de estabilidad como la relación entre el carbono recalcitrante y el carbono orgánico.

El segundo método consistió en la prueba respirométrica, la cual se llevó a cabo en el oxitop. Dicha prueba consiste en medir el CO₂ producido por la descomposición bacteriana del biochar, lo que a la vez disminuye el O₂ del medio; asimismo, el CO₂ es atrapado por NaOH, lo cual hace que la variación de O₂ del medio disminuya la presión del equipo (Six *et al.*, 2002).

Resultados

Producción de biochar - Rendimiento

En la Figura 1 se muestra que el rendimiento de la producción de biochar para todas las especies es influenciado por el incremento de la temperatura,

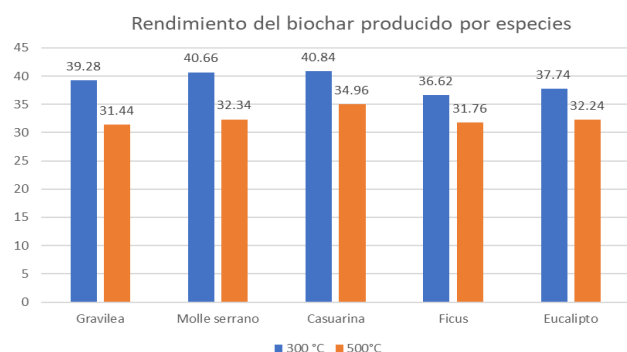


Figura 1. Rendimiento del biochar producido por especie.

Tabla 2. Análisis químico elemental de las especies seleccionadas por su abundancia en el campus de la UNALM

Especies/Análisis	Parámetros	Eucalipto	Grevillea	Molle Serrano	Casuarina	Ficus
Elemental	% C	43.25	47.44	43.85	44.36	36.91
	% H	5.58	6.11	6.21	6.15	5.37
	% N	0.72	0.45	10.82	20.98	1.20
	% S	0.31	0.28	0.17	0.51	0.27
Proximal	Humedad (% H)	13.68	15.79	56.70	49.26	14.01
	Material volátil (% V)	70.78	71.78	39.45	42.82	61.17
	Cenizas (% C)	8.89	4.48	1.67	5.03	19.20
	Carbón fijo (% CF)	6.66	7.96	2.19	2.90	5.63
PCS	MJ/Kg	18.7623	34.5697	42.4942	36.9899	19.0905

Fuente: Laboratorios de Energías Renovables (LER) UNALM.

Tabla 3. Caracterización física del biochar por especies a temperaturas de 300 °C y 500 °C

Especies/ Parámetros	% R 300 °C	% R 500 °C	pH (300 °C)	pH (500 °C)	Conductividad (300 °C)	Conductividad (500 °C)
Grevillea	39.28	31.44	8.6	9.05	2.02	2.42
Molle Serrano	40.66	32.34	9.16	9.57	1.42	2.22
Casuarina	40.84	34.96	8.26	9.63	1.31	1.20
Ficus	36.62	31.76	9.54	10.02	2.26	2.77
Eucalipto	37.74	32.24	9.33	9.77	1.30	1.27

% R: % Rendimiento.

así a 500 °C de temperatura el rendimiento de la producción del biochar es menor que a 300 °C de temperatura.

Caracterización física y química de los biochars

La Tabla 2 muestra los resultados de la caracterización de la materia prima en los análisis elementales, proximal y de poder calorífico superior (PCS). Por su parte, la Tabla 3 muestra el porcentaje de rendimiento obtenido de los biochars de las diferentes especies a 300 °C y 500 °C de temperatura de pirólisis, así como los análisis químicos de pH, conductividad por cada tratamiento y sus respectivas repeticiones.

Grado de estabilidad

En la Tabla 4 se presenta la descomposición del biochar en carbono lábil, carbono oxidable y carbono recalcitrante, así como sus relaciones porcentuales. Mediante el análisis estadístico, se comprobó que la temperatura presenta un mayor efecto en la estabilidad que la especie; asimismo, se observa que el carbono lábil y el carbono oxidable disminuyen conforme se incrementa la temperatura de pirólisis, mientras que el carbono recalcitrante se incrementa de manera directamente proporcional con la temperatura.

Tabla 4. Descomposición del carbono y grado de estabilidad

Especie	Parámetro				
	Carbono orgánico (%)	Carbono lábil (%)	Carbono oxidable (%)	Carbono recalcitrante (%)	Grado de estabilidad (%)
Eucalipto 300	59.42 ±2.11	10.21 ±5.43	34.10 ±3.28	43.68 ±4.01	0.74 ±0.04
Ficus 300	62.92 ±5.00	21.75 ±0.62	28.49 ±1.29	50.46 ±5.46	0.80 ±0.02
Grevilea 300	71.61 ±5.12	18.96 ±5.20	27.18 ±0.99	58.91 ±5.21	0.82 ±0.02
Casuarina 300	63.24 ±3.26	10.23 ±1.08	29.95 ±1.75	49.00 ±4.78	0.77 ±0.04
Molle 300	68.90 ±1.69	13.29 ±3.42	28.34 ±5.88	56.30 ±3.55	0.82 ±0.03
Eucalipto 500	70.80 ±4.80	6.72 ±7.34	18.15 ±1.33	62.49 ±4.74	0.88 ±0.01
Ficus 500	62.46 ±9.70	14.73 ±4.30	15.64 ±1.22	54.71 ±9.11	0.88 ±0.01
Grevilea 500	79.67 ±7.11	7.53 ±1.24	13.28 ±2.45	70.82 ±6.28	0.89 ±0.00
Casuarina 500	66.71 ±5.67	7.17 ±3.74	18.05 ±2.49	59.42 ±6.09	0.89 ±0.02
Molle 500	76.42 ±1.62	12.21 ±0.76	13.35 ±0.25	70.41 ±0.19	0.92 ±0.02

n = número de repeticiones por ensayo. n = 3.

Interacción de especies y temperatura en carbono oxidable (%) promedios

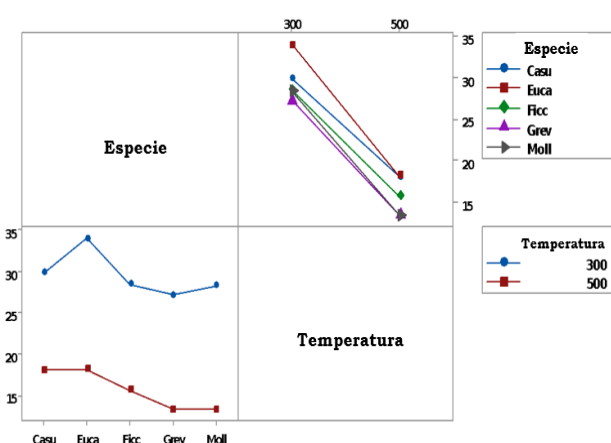


Figura 2. Interacción de especie y temperatura en la determinación de carbono oxidable.

El carbono lábil promedio, a 300 °C es de 14.89 %, mientras que a 500 °C es de 9.68 %. En el caso del carbono oxidable, presentado en la Figura 2, la variación es de 13.66 %, dado que la pirólisis de 300 °C presenta un promedio de 29.61 % y a 500°C, 15.95 %; la variación de carbono oxidable se presenta en mayor proporción que el carbono lábil. En el caso de carbono recalcitrante, presentado en la Figura 3, el promedio que se presenta en pirólisis de 300 °C es de 51.67 %; mientras que a 500°C es de 62.57 %.

Entre las especies evaluadas, el contenido de carbono lábil en las especies de Grevilea y Molle, presentan un bajo contenido porcentual de 13.25 % y 12.75 %, para 300 °C y 500 °C respectivamente. Asimismo, el contenido de carbono oxidable es bajo entre las especies evaluadas, pues presentan valores de 20.23 % y 20.85 % respectivamente, mientras que el carbono recalcitrante se presenta

Interacción de especies y temperatura en carbono recalcitrante (%) promedios

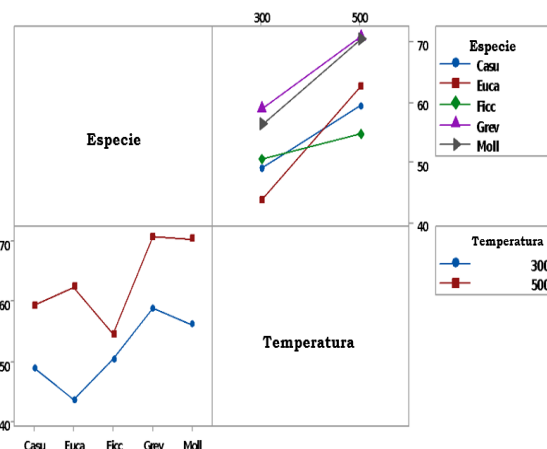


Figura 3. Interacción de especie y temperatura en la determinación de carbono recalcitrante.

en mayor proporción, siendo de 64.86 % y 63.36 % respectivamente. Respecto a los valores presentados, se diría que en la especie de Grevilea se presenta una variación de 11.92 % en el carbono recalcitrante respecto a la temperatura, mientras que en la especie de Molle la diferencia es de 14.11 %.

Además, la especie de Ficus, presenta una situación contraria a lo descrito de las otras dos especies, dado que presenta el menor contenido de carbono recalcitrante, el cual es de 52.58 %, un mayor contenido de carbono lábil que es de 18.24 % y un similar contenido de carbono oxidable de 22.06 %.

Respecto al grado de estabilidad de las 5 especies presentado en la Figura 4, se presentó un comportamiento que tiene relación con la temperatura, puesto que de manera general el grado de estabilidad es de 0.790 a 300 °C, mientras que a

Discusión

Interacción de especies y temperatura en grado de estabilidad(%) promedio

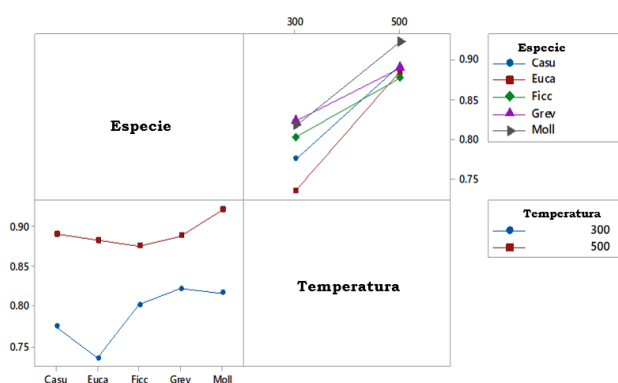


Figura 4. Interacción de especie y temperatura en la determinación del grado de estabilidad.

500 °C este sería de 0.892. Asimismo, al evaluar el grado de estabilidad por especie y temperatura, se observó que este se encuentran entre 0.735 y 0.921; por lo cual, de acuerdo con el indicador de grado de estabilidad que fue fijado en 0.500 por López *et al.* (2010), los resultados cumplirían con ser una enmienda estabilizada para el suelo.

Por otra parte, entre las fracciones de carbono orgánico, carbono lábil, carbono oxidable y carbono recalcitrante, se analizó la relación entre estos mediante una regresión lineal, de ella se obtuvo la ecuación (1), que se presenta a continuación:

$$GE = 0.907 - 0.000052T^{\circ} - 0.013966C^{org} + 0.00082C^{lab} - 0.000479C^{oxd} + 0.15923C^{rec} \quad (1)$$

En la ecuación se observa que los componentes de carbono lábil (C_{lab}) y carbono recalcitrante (C_{rec}) tienen una relación directa con el grado de estabilidad, mientras que en el caso del carbono orgánico (C_{org}), carbono oxidable (C_{oxd}) y la temperatura se presenta una relación inversa. Asimismo, cabe mencionar que la mayor relación con el grado de estabilidad se presenta en función al carbono recalcitrante (C_{rec}).

Respirometría

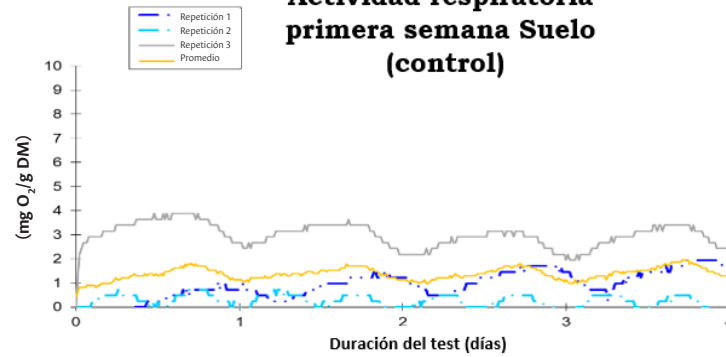
La prueba de AT_4 del biochar realizada en el Oxitop presenta un aporte de materia orgánica significativa para el suelo al ser comparado con un blanco (suelo sin biochar), como se observa en la Figura 5. Asimismo, en la Figura 6 en la que se compara la descomposición de los biochars producidos a 300 °C y 500 °C, se observa que a mayor temperatura la descomposición es menor, por lo cual se diría que el biochar más estable es el producido a mayor temperatura.

Se observa que el rendimiento de la producción de biochar de las diferentes especies disminuye a medida que se incrementa la temperatura Chen *et al.* (2021), esto se debe a que, durante la pirólisis, la pared celular del material se destruye, dando paso a la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa, ya que son estructuras más simples que la lignina Chen *et al.* (2021); ello ocurre en un intervalo de temperatura entre 200 a 300 °C (Ospina-Guarín *et al.*, 2014). Se observa también que la Casuarina (40.84 %) tiene el mayor rendimiento, seguido del Molle (40.66 %) y de la Grevilea (39.28 %), con una ligera variación entre ellas. Las especies que presentaron menores rendimientos son Eucalipto (37.74 %) y Ficus (36.62 %). Al incrementar la temperatura a 500 °C se observa que el rendimiento del biochar disminuye, debido a que a esta temperatura la lignina se ha descompuesto en su totalidad (Ospina-Guarín *et al.*, 2014), así la Casuarina presenta el mayor rendimiento (34.96 %), seguido de Molle (32.34 %) y Eucalipto (32.24 %) con una ligera variación; Chen *et al.* (2021) indican que se trata de especies que presentan mayor contenido de lignina. Los rendimientos menores fueron obtenidos por las especies Ficus (31.76 %) y Grevilea (31.44 %).

Por otra parte, la variación de rendimiento se da por la estructura inicial de la materia prima: Casuarina es una de las especies con mayor porcentaje de C (44.36 %), su alto contenido de humedad (49.26 %) y su bajo material volátil (42.82 %) la hacen una madera más resistente a la pirólisis. En el caso del Molle, el rendimiento se debería a su menor proporción de C (43.85 %) y a su baja composición de cenizas (1.67 %); por otro lado, Grevilea presenta una humedad baja (15.79 %), por lo cual es fácil de secar y transformar la estructura, lo que concuerda con su alta proporción de material volátil (71.78 %). Similar a Grevilea se presenta el caso de Eucalipto, pero al tener menor proporción de C (43.25 %) el rendimiento sería menor, asimismo en el caso de Ficus el porcentaje de C es de 36.91 % y las otras características son similares.

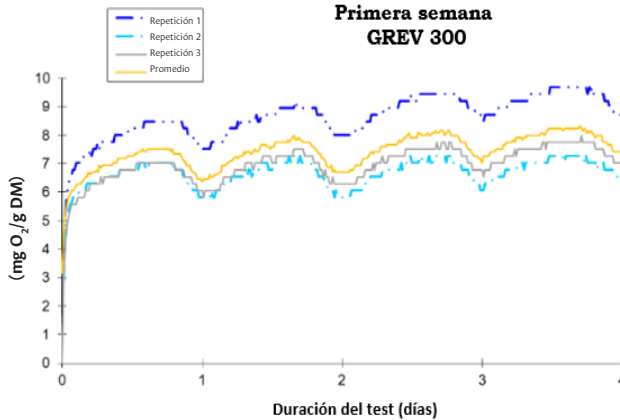
Con respecto a la caracterización química de los biochars se observa que el incremento de la temperatura aumenta el pH, pues se observa que los biochars se vuelven más básicos. Así, la especie que presenta el mayor pH para ambas temperaturas es el Ficus, que pasa de 9.54 a 10.02, seguido del Eucalipto que pasa de 9.33 a 9.77 y el Molle Serrano pasa de 9.16 a 9.57, siendo los biochars menos básicos la Grevilea y Casuarina (se observa una ligera variación): estas pasan de un pH de 8.6 y de 8.26 a 9.05 y 9.63 respectivamente. Dichos resultados son corroborados por Van Zwielen *et al.* (2010), quienes indican que al incrementar la temperatura de 500 a 600 °C el pH es más básico debido a la disminución de grupos funcionales de ácidos a temperaturas altas (Keiluweit *et al.*, 2010).

Actividad respiratoria primera semana Suelo (control)



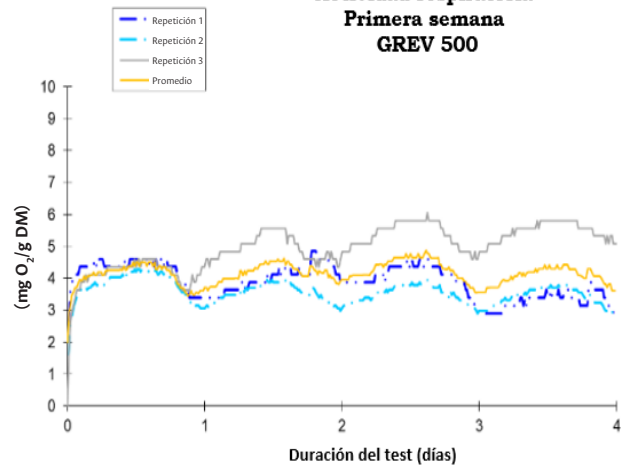
*AT₄ Suelo (Control). AT₄ = 1.3 mg O₂/g DM

Actividad respiratoria Primera semana GREV 300



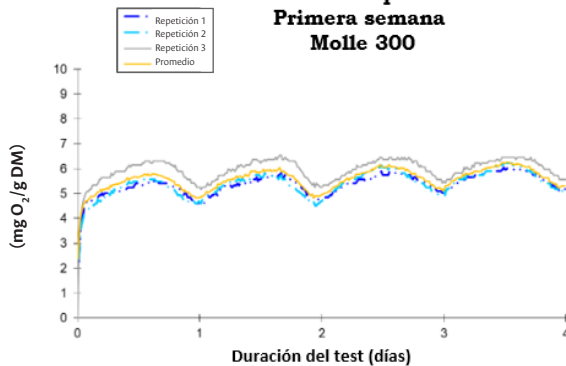
AT₄ Grevilea 300. AT₄ = 7.6 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 6.3 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Grevilea 300 °C.

Actividad respiratoria Primera semana GREV 500



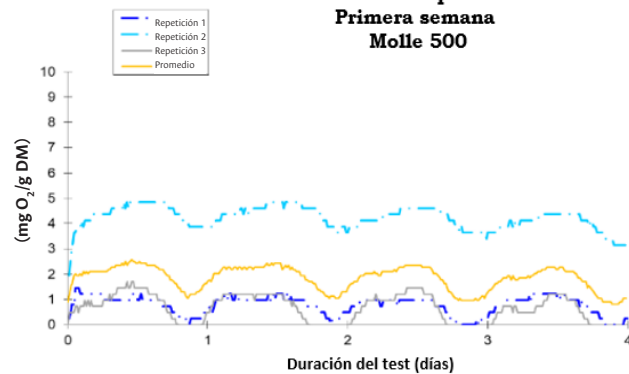
AT₄ Grevilea 500. AT₄ = 4.4 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 3.1 mg O₂/g DM, pero al ser más estable el C disponible es menor que Grevilea 300 °C.

Actividad respiratoria Primera semana Molle 300

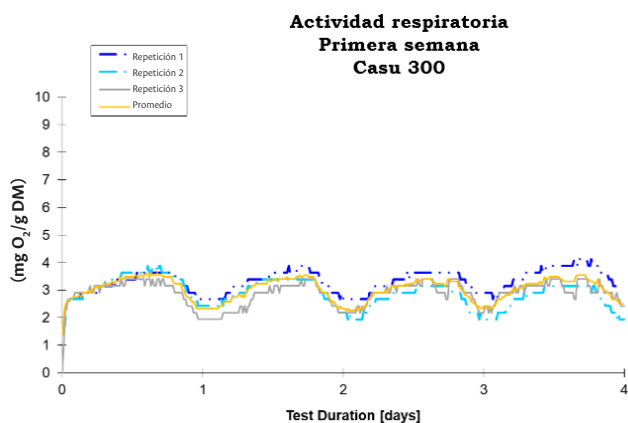


AT₄ Molle 300. AT₄ = 5.8 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 4.5 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Molle 300 °C. Esta es una de las especies con el biochar más estable.

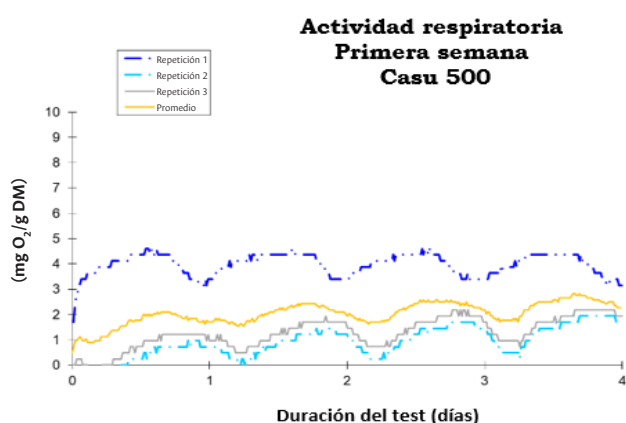
Actividad respiratoria Primera semana Molle 500



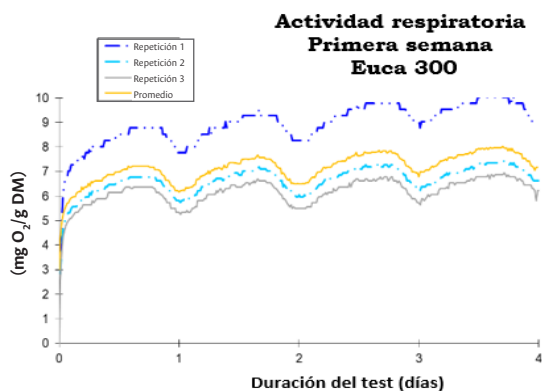
AT₄ Molle 500. AT₄ = 2.1 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 0.8 mg O₂/g DM, pero al ser más estable el C disponible es menor que Molle 300 °C



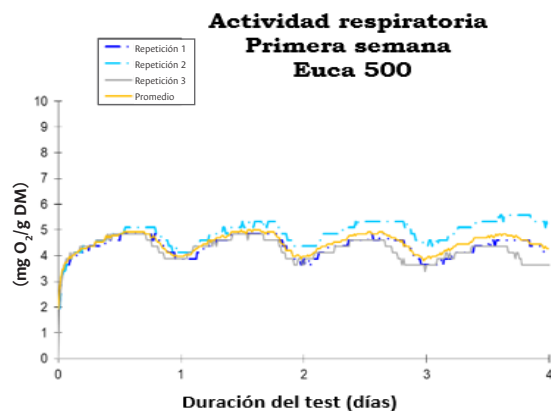
AT₄ Casuarina 300. AT₄ = 2.9 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 1.6 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Casuarina 300 °C.



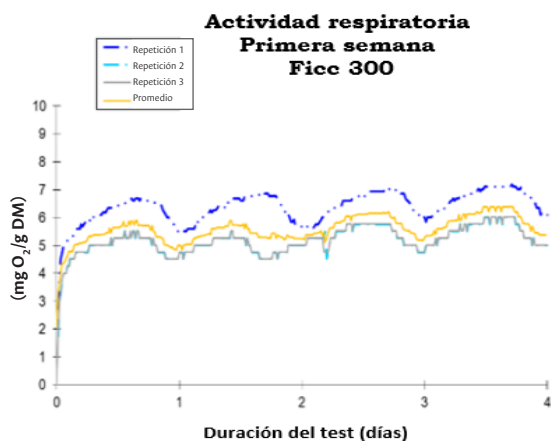
AT₄ Casuarina 500. AT₄ = 1.8 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 0.5 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Casuarina 500 °C, pero al ser más estable el C disponible es menor que Casuarina 300 °C.



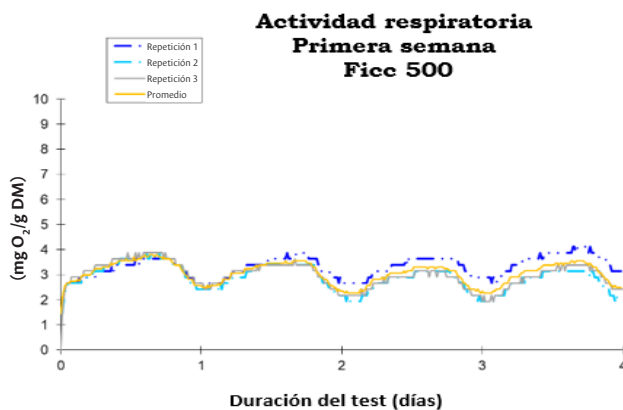
AT₄ Eucalipto 300. AT₄ = 7.3 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 6.0 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Eucalipto 300 °C.



AT₄ Eucalipto 500. AT₄ = 4.5 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 3.2 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Eucalipto 500 °C, pero al ser más estable el C disponible es menor que Eucalipto 300 °C.



AT₄ Ficus 300. AT₄ = 5.8 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 4.5 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Ficus 300 °C.



AT₄ Ficus 500. AT₄ = 2.9 mg O₂/g DM. El AT₄ se incrementa respecto a la muestra control en 1.6 mg O₂/g DM, por el C añadido del biochar Ficus 500 °C, pero al ser más estable el C disponible es menor que Ficus 300 °C.

Figura 5. Actividad respirométrica por biochar producido y blanco.

*El AT₄ se evaluó durante los 7 primeros días de ser añadido el biochar, por lo que la descomposición inicial es rápida, ya que se encuentra disponible el carbono lábil. Este con el tiempo debería de disminuir, puesto que empezará a utilizarse el carbono medio y posteriormente el carbono recalcitrante.

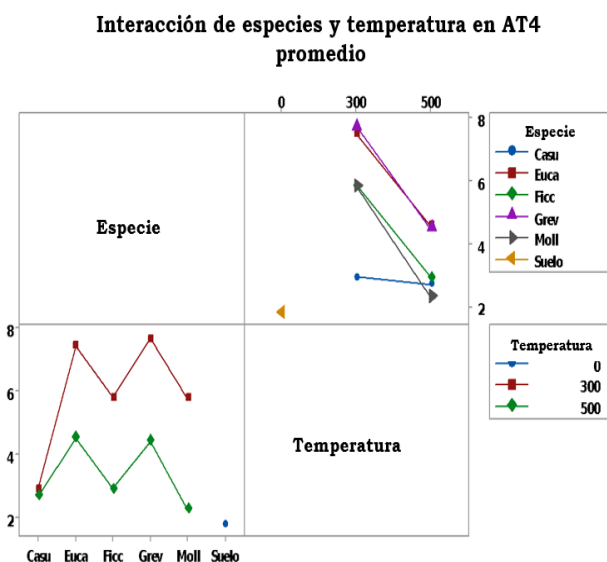


Figura 6. Interacción de especie y temperatura en la determinación de AT₄.

En el caso de la materia prima utilizada, se observa la variación de acidez en el biochar obtenido por la relación C:H. El pH más básico fue obtenido de Ficus, esto se debería a que tiene la relación C:H más baja de las especies evaluadas. Caso contrario se observa en Grevilea, una de las que presentó un pH básico bajo comparado con las otras especies, lo que sustenta su mayor relación C:H. Situación similar se presenta en Casuariana: esta tiene una relación C:H parecida a las presentada por Eucalipto y Molle, sin embargo, su alto contenido de N (20.98) disminuye la alcalinidad del proceso.

Además, el pH es un importante factor para reducir la emisión de N₂O, un importante GEI, de acuerdo con Brassard, Godbout y Raghavan (2016). El promedio del pH de biochar es 8.6, por lo cual contribuirían a disminuir este gas, y al presentarse pH mayores a 9, como es el caso de Ficus, Eucalipto, Molle Serrano y Casuarina, el efecto de mitigación sería aún mayor. Sin embargo, una vez agregado al suelo, también dependerá de otros factores ambientales y de la proporción en la que se usará la enmienda.

Con respecto a la conductividad eléctrica se observa una ligera variación a 500 °C frente a los valores obtenidos a 300 °C. Así, las especies que presentan ligeros incrementos son: Grevillea, que pasa de 2.02 μS/cm a 2.42 μS/cm; Ficus, de 2.26 μS/cm a 2.77 μS/cm; y Molle Serrano, de 1.42 μS/cm a 2.2 μS/cm. Las especies que presentan ligeras disminuciones son Casuarina, que pasa de 1.31 μS/cm a 1.20 μS/cm, y Eucalipto, de 1.30 μS/cm a 1.27 μS/cm, respectivamente.

Esta propiedad se sustenta en la disponibilidad de las sales en los biochars que han sido procesados de la materia prima elegida. En este caso la especie con mayor conductividad presentan un alto contenido

de cenizas y bajos contenidos de S, como es el caso de Ficus, que presenta cenizas en un 19.2 % y bajo contenido de S (0.27 %). Por el contrario, especies como Eucalipto y Casuarina presentan bajo contenido de cenizas (8.89 % y 5.03 % respectivamente) pero, a la vez, su contenido de S es mayor (0.31 % y 0.51 % respectivamente).

Respecto a la estructura carbonosa del biochar, la disminución del carbono lábil en el biochar producido es mayor cuando la temperatura de pirólisis se incrementa, lo cual se debería a que a mayor temperatura la materia orgánica se va volatilizando, ya que la hemicelulosa y la celulosa comienzan a cambiar de estado (Li *et al.*, 2021). Asimismo, el cambio de estado de la estructura es un indicador de la polimerización de la estructura, lo cual vuelve más estable al producto, puesto que permanece la estructura carbonosa más resistente (Zhang *et al.*, 2020).

De igual manera, mientras la estructura carbonosa libera hidrógenos y forma una estructura aromática, permite que la estructura, al ser más compleja, también sea más resistente (Zhang *et al.*, 2019). Los compuestos que permiten esta transformación son los que presentan cadenas carbonosas complejas, como es el caso de la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, y en menor medida los polisacáridos y las proteínas (Suárez-Abelenda, Kaal y McBeath, 2017).

El carbono recalcitrante varía en 4.27% en función de la temperatura, siendo esta la menor diferencia de las tres fracciones de carbono. La baja diferencia se debería a la composición de la materia prima, puesto que esta se conforma en mayor proporción por hemicelulosa (Pérez-Arévalo y Velazques-Martí, 2018), ya que esta es una estructura carbonosa de fácil descomposición (Heidari *et al.*, 2019); sin embargo, la proporción de este componente varía entre especie, siendo las especies de mayor dureza, como es el caso de Grevilea, las que presentan mayor contenido porcentual de celulosa. El caso contrario se presentaría en el Molle, el cual, al poseer ácidos fácilmente degradables tiende a estabilizarse fácilmente y a aromatizar su estructura más estable (Machado *et al.*, 2019).

Aller, Bakshi y Laird (2017) sostienen que la temperatura de pirólisis determina la estructura del producto, puesto que a 300 °C el producto estará conformado por un carbono de transición que es el resultado de la deshidratación de materiales volátiles y de la aromatización de los polímeros, mientras que el proceso que se realiza a 500 °C da como resultado un carbono amorfo que presenta una estructura estable y más aromática.

Respecto a la correlación de las tres fracciones carbonosas del biochar, la relación directa entre el grado de estabilidad y el carbono recalcitrante se debe a que esta es la estructura más difícil de mineralizar, mientras que la relación inversa

respecto al carbono lábil y oxidable se debería a que, contrario al carbono recalcitrante, estos aportan a la mineralización del producto. Similar afirmación fue realizada por Li y Chen (2018), quienes sostienen que la tasa de mineralización varía según cada uno de los componentes, siendo el menos estructurado el que presenta una mayor tasa de descomposición.

Respecto al % C que será añadido con la enmienda al suelo, al presentarse parte de esta como carbono lábil, proporciona una fuente de carbono que será degradada y emitida como CO₂ de manera sencilla, sin embargo al ser una proporción menor respecto al carbono medio y al carbono recalcitrante, las cuales presentan una estructura más compleja, no permite una fácil degradación del C y, por ende, secuestra el carbono por mucho más tiempo, lo que contribuye a la mitigación de GEI, ya que la emisión de CO₂ sería más lenta. Tal como lo afirman Brassard *et al.* (2016), el biochar producido a pirólisis lenta, cuya materia prima proviene de residuos agroforestales, llegaría a tener un tiempo de residencia de 100 años a 4000 años (Brassard *et al.*, 2016; Das, 2018).

Es importante mencionar que las especies evaluadas presentan una baja concentración de N %, con excepción de la Casuarina, lo que permitiría que el biochar presente bajos contenidos de N %, los cuales aportarán una cantidad de nutrientes sostenibles en el tiempo, sin contribuir a un abrupto ciclo de formación de N₂O, de acuerdo con Noegi *et al.* (2022). Por lo tanto, se mitigará la emisión de N₂O, un importante gas de efecto invernadero (GEI) que tiene un potencial de calentamiento de 298 comparado con el CO₂, ya que, así como lo afirmaron Brassard *et al.* (2016), los residuos agroforestales constituyen una gran alternativa para mitigar este GEI.

Respirometría

Se observa que la variación de los índices de AT₄ conforme se incrementa la temperatura es de 2.74⁴, dado que el promedio de AT₄ para biochar de 500 °C es 5.88 y para 300 °C es de 3.14; la diferencia se debería a que, como se describió previamente, a 500 °C el biochar obtenido es una estructura carbonosa más estable, mientras que a 300 °C aun es una estructura de transición, lo que permite una mayor mineralización (Zhang *et al.*, 2019 y Suárez-Abelenda *et al.*, 2017).

Con base en el índice reconocido por la norma austriaca de residuos sólidos (Brown *et al.*, 2018), el cual establece como límite 7 mg O₂/gDM, los biochars producidos son considerados productos estables y constituyen una fuente de carbono para el suelo, sin embargo, los productos de Eucalipto a 300 °C y Grevilea a 300°C, por su alto índice de descomposición, no son estables bajo esa condición.

Conclusiones

El biochar producido en todas las especies y temperaturas, según el grado de estabilidad superior a 0.500, serían estables, sin embargo, al ser comparados con la prueba AT₄, se observan como excepciones al Eucalipto a 300 °C y la Grevilea a 300 °C.

La mayor estabilidad del producto se obtiene mediante pirólisis a 500 °C, lo que incrementa el GE en 10 % respecto a pirólisis de 300 °C

La composición de la materia lignocelulósica determina la variación de estabilidad del biochar producido, destacando de estas el molle y la casuarina.

Teniendo en cuenta el índice de AT₄ y el GEI, el biochar más estable corresponde a Molle a 500 °C.

La estructura carbonosa media y recalcitrante de los biochars obtenidos contribuye a la mitigación de GEI, puesto que el proceso de mineralización es complejo debido a la estructura del producto.

Agradecimientos

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Agraria la Molina y al laboratorio de Energías Renovables.

Referencias

- Aller, D.; Bakshi, S. y Laird, D. (2017). Modified method for proximate analysis of biochars, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012>
- Brassard, P.; Godbout, S. y Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved, *Journal of Environmental Management*, 181, 484-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.063>
- Brown, D.; Hughes, C.; Spence, M.; Bonte, M. y Whale, G. (2018) Assessing the suitability of a monometric test system for determining the biodegradability of volatile hydrocarbons, *Chemosphere*, 195, 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.169>
- Chen, D. Chen, Yu, X.; Song, C.; Pang, X.; Huang, J.; Li, Y. (2016). Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar, *Bio resource Technology*. Vol. 218, pp. 1303 - 1306
- Cheng, J.; Hu, S.; Sun, G.; Geng, Z. y Zhu, M. (2021). The effect of pyrolysis temperature on characteristics of biochar, pyrolytic acids, and gas prepared from cotton stalk through a polygeneration process, *Industrial Crops and Products*, 170, 113690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113690>
- Das, S. K.; Ghosh, G. K.; Avasthe, R. K. y Kundu, M. Ch. (2018). Preparation and characterization of biochars for their application as a soil amendment, *Indian Journal of Hill Farming*, 31(1), 141-145. https://www.researchgate.net/publication/326589014-Preparation_and_Characterization_of_Biochars_for_their_Application_as_a_Soil_Amendment
- Heidari, A.; Khaki, E.; Younesi, H. y Lu, H. (2019). Evaluation of fast and slow pyrolysis methods for bio-oil and activated

- carbon production eucalyptus wastes using a life cycle assesment approach, *Journal of Cleaner Production*, 214, 118394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118394>
- IBI (International Biochar Initiative). (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf
- Keiluweit, M.; Nico, P. S.; Johnson, M.G. y Kleber, M. J. E. S. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar), *Environmental Science and Technology*, 44(4), 1247-1253. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es9031419>
- La República. (2017). Multan a Universidad Agraria con S/2.4 millones por incendio que duró 6 horas. <http://larepublica.pe/sociedad/860370-multan-universidad-agraria-con-s24-millones-por-incendio-que-duro-6-horas>
- LECO Corporation. (2013). Carbon, hydrogen, and nitrogen in coal, instrument: CHN628. https://eu.leco.com/images/Analytical-Application-Library/CHN628_COAL_203-821-403.pdf
- Lehmann, J. y Joseph, S. (Eds.). (2009). *Biochar for environmental management, Science and technology*. Londres: Earthscan. <http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/First%20proof%2013-01-09.pdf>
- Li, S. y Chen, G. (2018). Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization off feedstocks and biochar derives at different pyrolysis temperature, *Waste Management*, 78, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.048>
- Li, C.; Sun, Y.; Zhang, S.; Wang, Y.; Xiang, J.; Hu, S.; Wang, S. y Hu, H. (2021). Pyrolysis of sesame residue: Evolution of the volatiles and structures of biochar versus temperature, *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101859>
- López, M.; Huerta-Pujol, O.; Martínez-Farré, F. X. y Soliva, M. (2010). Approaching compost stability from Klason lignin modified method: Chemical stability degree for OM and N quality assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 171-181. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/11181/SD%20pre-print.f.jsessionid=26A9F8C3A611517FCC2D82C770B9BFEB?sequence=1>
- Machado, C.; Raman, V.; Tehman, J.; Maia, B.; Meneghetti, E.; Almeida, V.; Farago, P.; Khan, I. y Budel, J. (2019). Schinus molle: Anatomy of leaves and stems, chemical composition and insecticidal activities of volatile oil against bed bug (*Cimex lectularius*). *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 29, 1-10. https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pi102-695X2019000100001
- Noegi, S.; Sharma, V.; Khan, N.; Chaurasia, D.; Ahmad, A.; Chauhan, S.; Singh, A.; You, S.; Pandey, A. y Bhargava, P. (2022). Sustainable biochar: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy, *Chemosphere*, 293, 133474. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133474>
- Ospina-Guarín, V.; Buitrago-Sierra, R. y López-López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera, *Tecnológicas*, 17,(32), 75-84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pi123-77992014000100008
- Palacios, R. (2020). Estabilidad y calidad de biochar de residuos agroforestales de la UNALM [tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4380/palacios-hugorosario-natividad.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez-Arévalo, J. y Velázquez-Martí, B. (2018). Evaluation of pruning residues of *Ficus benjamina* as a primary biofuel material, *Biomass and Bioenergy*, 108, 217-223. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953417303926>
- Six, J.; Conant, R. T.; Paul, E. A. y Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils, *Plant and Soil*, 241, 155-176. https://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/paul-lab/docs/Six_PltSoil2002.pdf
- Suárez-Abelenda, M.; Kaal, J. y McBeath, A. V. (2017). Translating analytical pyrolysis fingerprints to Thermal Stability Indices (TSI) to improve biochar characterization by pyrolysis-GC-MS, *Biomass and Bioenergy*, 98, 306-320. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953417300387?via%3Dihub>
- Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K. Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S. y Cowie, A. (2010). Appendix C-Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. In *Biochar production and use: Environmental risks and rewards*. Adriana Downie-PhD Thesis.
- Wang, J.; Xiong, Z. y Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects, *GCB Bioenergy*, 8, 512-523. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcbb.12266>
- Wang, S.; Zhang, H.; Huang, H.; Xiao, R.; Li, R. y Zhang, Z. (2020). Influence of temperature and residence time on characteristics of biochar derived from agricultural residues: A comprehensive evaluation, *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.028>
- Zhang, P.; Huang, P.; Xu, X.; Sun, H.; Jiang, B. y Liao, Y. (2019). Spectroscopic and molecular characterization of biochar-derived dissolved organic matter and the associations with soil microbial responses, *Science of the Total Environment*, 708, 134619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134619>
- Zhang, C.; Zhang, Z.; Zhang, L.; Li, Q.; Li, C.; Chen, G.; Zhang, S.; Liu, Q. y Hu, X. (2020). Evolution of the functionalities and structures of biochar in pyrolysis of poplar in a wide temperature range, *Bioresource Technology*, 304, 123002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123002>