



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“CARACTERIZACIÓN Y TOXICIDAD DEL BIOCHAR OBTENIDO
A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE CASCARILLA DE ARROZ,
PERGAMINO DE CAFÉ Y RESTOS DE PODA DE ARÁNDANO”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Cristina Sumari Flores (0000-0003-4099-0857)

Asesor:

Wilson Castañeda Rodríguez (0000-0002-9026-8021)

Lima – Perú

2022

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 10 de enero del 2023.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Blgo. Dámaso Wilfredo Ramirez Huaroto
Miembro: Mg. Ing. Marisol Nuñez Martinez
Miembro: Mg. Ing. César Oswaldo Arévalo Hernández

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

"CARACTERIZACIÓN Y TOXICIDAD DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE CASCARILLA DE ARROZ, PERGAMINO DE CAFÉ Y RESTOS DE PODA DE ARÁNDANO"

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **Cristina Sumari Flores**

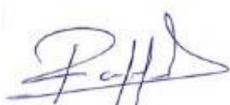
Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorado por: Ing. Wilson Castañeda Rodriguez

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime () por mayoría simple (X) calificar a:

Tesis: Cristina Sumari Flores			Nota (en letras): (Dieciséis)16
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Mg. Blgo. Dámaso Wilfredo Ramirez Huaroto
Presidente



Mg. Ing. Marisol Nuñez Martinez
Miembro 1



Mg. Ing. César Oswaldo Arévalo Hernández
Miembro 2



Ing. Wilson Castañeda Rodriguez
Asesor

ANEXO: FORMATO DE DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DE CONTENIDO DE INFORME FINAL DE TESIS / TRABAJO DE INVESTIGACIÓN¹

Lima, 26 de 01 del 2023

Señor,
Damaso Ramirez Huaroto

**Director General de Investigación, Desarrollo e Innovación
Universidad Científica del Sur
Presente.** –

De nuestra consideración,

Yo: Cristina Sumari Flores, estudiante/egresado de la carrera de Ingeniería y gestión ambiental de la Universidad Científica del Sur, en conjunto con el asesor/la asesora de tesis Wilson Castañeda Rodríguez declaramos que este informe final de tesis/trabajo de investigación titulado: Caracterización y toxicidad del biochar obtenido a partir de la pirólisis de cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándano, sustentado para obtener el título/grado de Ingeniero Ambiental es original.

Es decir, no contiene plagio parcial ni total, cuando se utilizó información de fuentes externas se reconoció la autoría mediante la adecuada citación y los resultados obtenidos son producto entero de mi investigación y no han sido falseados ni fabricados. Todo esto en cumplimiento del Código de ética en la investigación, Reglamento del Comité de Integridad Científica, Reglamento de Propiedad Intelectual, Normas y procedimientos de los trabajos de investigación para la obtención de títulos profesionales y grados académicos ², que afirmamos conocer en su totalidad.

Por ello, en caso de identificarse alguna situación de plagio, falsificación o fabricación de resultados, nos allanamos al proceso de investigación que establezca la Universidad y las posibles sanciones que pudieran surgir.

Firmamos en conformidad con lo declarado,



Firma tesista
DNI: 73657902



Firma del asesor de tesis
DNI:17628411

¹ En conformidad con la Resolución del Consejo Directivo N° 084-2022-SUNEDU/CD

² Los documentos están en: <https://investigacion.cientifica.edu.pe/reglamentos/>

INFORME DE REVISIÓN DE ORIGINALIDAD

Título del documento evaluado. Caracterización y toxicidad del biochar obtenido a partir de la pirólisis de cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándano

Autores. Cristina Sumari Flores.

Mecanismo de revisión de originalidad. Evaluación con Turnitin (ID 2003545094).

Resultado de la evaluación. 5%

Revisado por. Magaly Kelly Guerrero Huaracallo.

Comentarios sobre la revisión. Filtros usados: excluir fuentes de menos de 12 palabras.

Caracterización y toxicidad del biochar			
INFORME DE ORIGINALIDAD			
5%	5%	0%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
FUENTES PRIMARIAS			
1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet		1%
2	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet		1%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet		<1%
4	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet		<1%
5	www.interciencia.org Fuente de Internet		<1%
6	investigaciones.ut.edu.co Fuente de Internet		<1%
7	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet		<1%
8	tumi.lamolina.edu.pe Fuente de Internet		<1%
9	www.wattagnet.com Fuente de Internet		<1%

CARACTERIZACIÓN Y TOXICIDAD DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DE CASCARILLA DE ARROZ, PERGAMINO DE CAFÉ Y RESTOS DE PODA DE ARÁNDANO

Resumen

El uso de biochar apela a la estrategia de secuestro de carbono en el suelo al ser empleado como enmienda, esta técnica no solo mejora algunas características físico-químicas de los suelos sino que adicionalmente se han reportado efectos positivos sobre las características productivas del cultivo como incremento del rendimiento y disponibilidad de nutrientes; sin embargo, su uso apropiado implica la determinación de la dosis apropiada y sus efectos tóxicos sobre los cultivos; por ello la presente investigación se planteó como objetivo evaluar las características físico-químicas (pH,CE, CIC, Materia Organica , N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd y Cr) y toxicidad del biochar obtenido por pirólisis lenta a 300°C a partir de cascarilla de arroz, pergamino de café y residuos de poda de arándano. La caracterización se llevó a cabo según las indicaciones de Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales y la determinación de la dosis límite como enmienda mediante el análisis cuantal Probit en plántulas de aguaymanto. El biochar de residuos de poda de arándano se caracteriza por su alto contenido de Fe, Cu, Zn, Mn y B y la más alta cantidad de carbono fijo (73.02%). El biochar de cascarilla de arroz destaca por su pH cercano a la neutralidad (6.17), una CIC importante (19.2 meq/100g), CE baja (2.36 dS/m) y el más alto contenido de MO (30.54%). El biochar de pergamino de café presenta un contenido superior de humedad (44.87%), bajo contenido de macro y microelementos y una cantidad importante de cromo (19.26 ppm). El biochar de pergamino de café es menos tóxico respecto al biochar proveniente cascarilla de arroz y residuos de poda del arándano y su dosis límite como enmienda es del 90%; sin embargo, dentro de la probabilidad de obtener plantas sin señales de toxicidad, corresponden dosis que van entre 19% y 30% en mezcla con el sustrato o suelo. Se concluye que, aunque el biochar de las fuentes caracterizadas permita el rehúso de elementos orgánicos de la agroindustria, estos deben tratarse como cualquier otro insumo que ingresa al proceso agrícola estableciendo su inocuidad sobre el cultivo de manera preliminar.

Palabras clave: biochar; cascarilla de arroz, pergamino de café, residuos de poda de arándano.

Abstract:

The use of biochar appeals to the strategy of carbon sequestration in the soil as being used as an amendment, this technique not only improves some physical-chemical characteristics of the soils but additionally positive effects have been reported on the productive characteristics of the crop such as increased yield and availability of nutrients; however, its appropriate use involves the determination of the appropriate dose and its toxic effects on crops; Therefore, the present research aimed to evaluate the physicochemical characteristics (pH, CE, CIC, Organic Matter, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd and Cr) and toxicity of the biochar obtained by slow pyrolysis at 300 ° C from rice husks, coffee parchment and blueberry pruning residues. The characterization was carried out according to the indications of the American Society for Tests and Materials and the determination of the limit dose as an amendment by means of the Probit quantal analysis in aguaymanto seedlings. Blueberry pruning residue biochar is characterized by its high content of Fe, Cu, Zn, Mn and B and the highest amount of fixed carbon (73.02%). The rice husk biochar stands out for its pH close to neutrality (6.17), an important CEC (19.2 meq/100g), low EC (2.36 dS/m) and the highest MO content (30.54%). Coffee parchment biochar has a higher moisture content (44.87%), low content of macro and microelements and a significant amount of chromium (19.26 ppm). Coffee parchment biochar is less toxic compared to biochar from rice husk and blueberry pruning residues and its limit dose as an amendment is 90%; However, within the probability of obtaining plants without signs of toxicity, doses ranging between 19% and 30% in mixture with the substrate or soil correspond. It is concluded that, although the biochar of the characterized sources allows the recycling of organic elements of agribusiness, these should be treated as any other input that enters the agricultural process by establishing their safety on the crop in a preliminary manner.

Keywords: biochar; Rice husks, coffee parchment, blueberry pruning residues.

Introducción

Tradicionalmente, la biomasa lignocelulósica de cosechas y podas son utilizadas como enmienda en suelos agrícolas con la finalidad de aprovechar la biomasa generada en los procesos productivos agrícolas y agroforestales mediante el reciclaje y representa una alternativa ambiental sostenible a la quema de biomasa en pilas, que es también una práctica común los cultivos agroindustriales (Ávila, 2020; Escudero, 2019; Medina et al., 2015).

Entre otros métodos de manejo de la biomasa, se encuentra la conversión en biochar, que se trata de un proceso de descomposición térmica de la biomasa (Li *et al.*, 2020; Kwapinski et al., 2010) que permite reciclar diversos residuos ricos en lignocelulosa (Campos *et al.*, 2020; Bashir *et al.*, 2018). Entre las condiciones para su obtención, se basa en la combustión incompleta de biomasa vegetal entre 300 y 500°C de temperatura en bajas condiciones de oxígeno, que genera un producto similar al carbón vegetal, pero más poroso y de grano fino y, que también puede ser reincorporado al suelo (Abenza, 2012; Gómez, 2017).

El biochar, presenta un alto contenido de carbono y es altamente resistente a la descomposición (Jiang et al., 2013; Tomczyk *et al.*, 2020), por lo que su aplicación funciona como reservorio de larga duración de carbono recalcitrante a diferencia de otras enmiendas procedentes del compostaje y humificación (Lefebvre *et al.*, 2020). El uso de biochar se basa en la estrategia de fijación de carbono en el suelo (Ennis et al., 2012; Gay, 2015) al ser empleado como enmienda (García-Jaramillo, 2015), esta técnica no solo mejora algunas características físicas y químicas de los suelos (Cairo *et al.*, 2018; Gilces, 2014), sino que adicionalmente se han reportado efectos positivos sobre las características productivas del cultivo (Ye *et al.*, 2020) y la calidad de la cosecha final (Arostegui, 2019; Cuenca, 2019).

El aumento del rendimiento de los cultivos es un beneficio comúnmente reportado de agregar biochar a los suelos. Sin embargo, los resultados son variables; respecto al suelo, el biochar mejora la capacidad de retención de agua del suelo, junto con una mejor disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Jeffrey et al., 2011). No obstante, se reportan resultados promisorios al aplicar biochar a una tasa de 100 t ha⁻¹(39%); sin

embargo, existen obstáculos económicos y técnicos actuales para el uso de biochar en la agricultura y mitigación del cambio climático (Bach et al., 2016)

Por otro lado, no es muy claro aún el panorama respecto al uso de biochar debido a que se reportan también efectos negativos y toxicológicos sobre la planta (Godlewska et al., 2021; Quintero *et al.*, 2019; Xiang et al., 2021), por lo que su estudio como enmienda debe ser analizado en forma específica de acuerdo al tipo de suelo (Gallo *et al.*, 2018), tipo de cultivo (González *et al.*, 2019) y tipo de biochar respecto a su procedencia y temperatura de pirólisis (Moreno *et al.*, 2015).

Guerra (2015), menciona que los productores de arroz en el Perú desconocen de las prácticas de conservación del suelo y no tienen información sobre el reusó de la cascarilla de arroz, que tiene en un 85 a 90% de Si, por lo que su aplicación puede regresar el Si absorbido por la planta durante su desarrollo en forma de ceniza. Además, la cascarilla de arroz tratada química y térmicamente a 300°C, es un material adsorbente eficiente para remover metales pesados como Cd²⁺ (Sabina, 2020). En el caso del biochar proveniente del cultivo del café, Garaycochea (2020) afirma que el uso del biochar obtenido de uno de los residuos como el endocarpio de café ayuda a disminuir la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales y Wen-Tien (2017) destaca su uso potencial como enmienda. Respecto al biochar proveniente de arándano, Liu *et al.* (2021), afirman que la gestión de residuos de cosecha y poda es un problema actual y y hasta la fecha afirma no se ha reportado su uso como enmienda como parte de la economía circular dentro del proceso productivo.

Además, según reportes del MIDAGRI (2021), el arroz se ha constituido en el primer cultivo en importancia porque representó el 11,9% del valor bruto de la producción agrícola (VBP) en el 2020. El cultivo del café, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática, para el año 2019, ocupa el primer lugar en la conformación del valor bruto de la producción de los cultivos permanentes, en tanto como porcentaje del VBP de la actividad agrícola, se registró en 7,6% (MIDAGRI, 2020). El arándano por otro lado, ha superado las 160mil toneladas de arándanos frescos anuales (Diario Gestión, 2021).

Los cultivos de café, arándano y arroz en el Perú (Alvarado, 2019; Galindo *et al.*, 2015), dejan grandes cantidades de residuos agroindustriales: pergamino de café, residuos de

poda y cascarilla de arroz (Velázquez *et al.*, 2019), producto del procesamiento primario y secundario que generan impacto sobre el ambiente ya que, al no ser aprovechadas, generan contaminantes gaseosos (CH₄ y CO₂) durante su descomposición (Corredor y Pérez, 2018; Rathinavelu y Graziosi, 2005). Por lo tanto, la oportunidad de retornar este recurso al suelo como biochar se convierte no solo en una solución, sino en una oportunidad de generar mayores ingresos para los agricultores a la vez que se captura y almacena, cantidades importantes de CO₂ en el suelo a la vez que aumenta su fertilidad.

Por ello, la finalidad de la presente investigación es presentar la caracterización de tres tipos de biochar que son obtenidos a partir de residuos agroindustriales importantes en la industria peruana (cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándanos) bajo condiciones de pirólisis lenta para el estudio de sus efectos potenciales toxicológicos en las plantas a través del análisis de la dosis letal media (DL50) de la enmienda. De esta manera, se presenta como el primer paso para futuras investigaciones sobre su uso como enmienda en el país.

Materiales y métodos

Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad Nacional Agraria La Molina ubicada en el distrito de La Molina cuyas coordenadas son 12°04'55"S 76°56'53"O.

Obtención de los residuos agroindustriales

La cascarilla de arroz (*Oryza sativa* L.) fue obtenida del Molino Samán, ubicado en el sector de los Angeles Mz A Lote 3 Pakatnamu, provincia de Pacasmayo, región de La Libertad, correspondiente a la variedad NIR. Se utilizó 10 kg de cascarilla de arroz seca. El pergamino de café (*Coffea arabica* L.) se obtuvo de una finca de café ubicada en la carretera Baños Termales km 0.650, provincia de Moyobamba, región de San Martín, producto del beneficio del grano de la variedad Típica. Se empleó un saco de 10 kg de peso de pergamino seco que queda como producto de pelar el grano de café. La poda de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) se obtuvo de una finca ubicada en Panamerica Norte, Puerto Mori 2 Km.530 Lote VD03, La Libertad. Se empleó un saco de 10 kg de peso de residuos de poda frescos.

Pirólisis de la biomasa residual

Para todos los casos, la biomasa obtenida se llevó a un horno pirolítico perteneciente al Círculo de Investigación y Pirólisis de Biomasa de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Dicho horno funciona a gas propano y el proceso fue efectuado a 300 °C.

Caracterización físico-química del biochar

Los parámetros físico-químicos fueron analizados en el Laboratorio de Servicios de Análisis Químicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los parámetros analizados fueron, pH mediante potenciometría en pasta saturada (Villalta et al., 2018), CIC mediante el método de acetato de amonio (Rodríguez y Rodríguez, 2002), CE mediante potenciometría en pasta saturada (Villalta et al., 2018), materia orgánica mediante Wakley y Black (Lara et al., 2013), N mediante el método Kjeldahl (Martí et al., 2021), P mediante el método del azul de molibdeno (Zhang et al., 2016), B mediante el método colorimétrico con curcumina (Kraska et al., 2018); mientras que los elementos K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd y Cr fueron determinados mediante el método de absorción atómica (Velásquez et al., 2019).

Análisis próximo o termogravimétrico del biochar

Las características que a continuación se mencionan se analizaron en el Laboratorio de Servicios de Análisis Químicos de la UNALM. Los parámetros analizados incluyen: contenido de humedad (método gravimétrico), contenido de materia volátil, contenido de ceniza y carbono fijo, de acuerdo a los procedimientos descritos por Gómez et al, (2016).

Ensayo de límite de tolerancia media del biochar sobre plántulas de aguaymanto (*Physalis peruviana*)

Para el ensayo se tomó en consideración el aguaymanto (*Physalis peruviana*) debido a que este cultivo tiene un crecimiento rápido y es un buen indicador fisiológico (De Melo et al., 2020). Se procedió según la metodología de la DL50 y se establecieron 11 tratamientos que corresponden a concentraciones crecientes (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%) por cada tipo de biochar (cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándano), dicho porcentaje representa la cantidad de biochar mezclada con arena de río en proporción volumen/volumen. Se adquirió

semilla de aguaymanto del “Huerto” de la Universidad Nacional Agraria La Molina, la cual se sembró en bandejas de hoyos de 100 cc. Se sembraron 30 semillas en total por tratamiento y se contabilizó hasta el día en que ya no germinen más semillas (aproximadamente 21 días) el número de semillas germinadas para establecer por cada concentración el número de plantas muertas (no germinadas) y vivas (germinadas) que corresponde para el cálculo de la mortalidad y posterior determinación de la dosis letal media según el modelo Probit que a su vez está asociada con su toxicidad.

Análisis estadístico

Los datos provenientes de los análisis físicos y químicos fueron descritos mediante los estadísticos descriptivos de promedio en tablas. Los datos dicotómicos provenientes del ensayo toxicológico (plantas germinadas y plantas muertas) fueron sometidos al análisis de regresión logística Probit empleando el software estadístico SPSS versión 26.

Resultados y discusión

Características fisicoquímicas del biochar

Los tres tipos de biochar evaluados muestran que el biochar procedente de cascarilla de arroz con un pH ligeramente ácido, conductividad eléctrica baja y elevada CIC (Tabla 1) muestra hasta aquí un mayor potencial para su uso como enmienda, debido a que los cultivos requieren pH cercano a la neutralidad o ligeramente ácido para sostener la producción agrícola. Un pH elevado, así como la conductividad eléctrica está asociado a daño fisiológico (marchitamiento, enanismo y clorosis) en los cultivos al igual que en los suelos salinos (Villalta y Ortega, 2018). El pH es una propiedad relevante que debe ser considerado ya que inicialmente depende de la materia prima sometida a pirólisis y tiene un efecto directo sobre la interacción con el suelo y la planta (McElligot *et al.* 2011).

La CIC es una característica importante porque afecta la reserva de nutrientes y su liberación en la solución suelo, debido a los procesos de adsorción y desorción de cada suelo (Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012). Mientras que la CE que está asociada al contenido de sales abundantes genera una consecuencia negativa en las plantas al elevar el potencial osmótico y generar sequía fisiológica o alteraciones en la absorción de nutrientes (Villalta y Ortega, 2018).

Tabla 1. Características generales de tres tipos de biochar

Tipo de biochar	Hd %	pH -	C.E. dS/m	CIC meq/ 100g
Biochar de poda de arándano	8.55	9.79	4.27	10.80
Biochar de cascarilla de arroz	3.67	6.17	2.36	19.20
Biochar de pergamino de café	44.87	9.79	4.31	12.00

Respecto a la concentración de macronutrientes, el biochar proveniente de cascarilla de arroz presenta el mayor contenido de materia orgánica con 30.54% y baja concentración de nitrógeno (Tabla 2). Ninguno de los macroelementos (N, P, K, Ca, Mg) son abundantes, precisamente el carbón una vez pirolizado no se caracteriza por ser una fuente especialmente de nutrientes, pero sí de materia orgánica. Sobre los micronutrientes, destaca el biochar de residuos de poda de arándano por su riqueza en fierro (Tabla 3), cobre y manganeso sobre las otras dos fuentes analizadas.

Tabla 2. Concentración de macronutrientes de tres tipos de biochar

Tipo de biochar	M.O. %	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %
Biochar de poda de arándano	8.57	1.05	1.33	1.75	2.01	0.63
Biochar de cascarilla de arroz	30.54	0.50	0.13	1.37	0.25	0.13
Biochar de pergamino de café	10.57	1.19	1.52	1.58	1.49	0.44

Tabla 3. Concentración de micronutrientes de tres tipos de biochar

Tipo de biochar	Na %	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	B ppm
Biochar de poda de arándano	0.17	4238	86	45	750	37
Biochar de cascarilla de arroz	0.06	296	4	23	235	20
Biochar de pergamino de café	0.15	1250	67	40	753	25

También se analizó la concentración de plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr VI) por su importancia en la actividad agrícola al ser aplicado como enmienda. Resalta con 19.6 ppm de Cr el biochar que proviene de pergamino de café (Tabla 4), este elemento puede provenir del suelo o puede contaminarse con metales de otros insumos empleados en el cultivo (Montero *et al.*, 2021).

Tabla 4. Concentración de metales pesados de tres tipos de biochar

Tipo de biochar	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
Biochar de poda de arándano	4.72	0.46	5.48
Biochar de cascarilla de arroz	1.24	0.08	1.38
Biochar de pergamino de café	2.48	0.28	19.26

Tras esta caracterización se aprecia una considerable cantidad de Cr y Fe en el biochar de pergamino de café, por otro lado, el biochar de la cascarilla de arroz debido a su bajo pH, contenido de materia orgánica y baja presencia de metales pesados destaca como una materia potencial para su uso como enmienda desde el punto de vista de abundancia de materia orgánica, pH cercano al neutro y poca disponibilidad de metales pesados que puedan generar toxicidad en el vegetal u otro ser vivo por acumulación en la planta.

Análisis proximal del biochar

El análisis proximal o termogravimétrico muestra que el biochar de poda de arándano tiene el mayor contenido de carbono fijo, lo que no concuerda necesariamente con su contenido de materia orgánica y cenizas. De igual manera el biochar de cascarilla de arroz

presenta mayor contenido de cenizas que se relaciona con la concentración de nutrientes y minerales como calcio (Ca), sodio (Na), silicio (Si), magnesio (Mg), potasio (K), y en menor cantidad fósforo (P), manganeso (Mn) y de aluminio (Al), Azufre (S), hierro (Fe), (Gallo *et al.*, 2018). Estos minerales y nutrientes se encuentran en forma fosfatos, silicatos, óxidos sulfatos y carbonatos en el biochar (Díaz, 2019), podrían estar asociados a su efecto estimulante sobre las plantas.

Tabla 5. Composición próxima de tres tipos de biochar

Tipo de biochar	Humedad %	Materia Volátil %	Cenizas %	Carbono fijo %
Biochar de poda de arándano	10.14	12.69 (11.40) *	4.16 (4.10)	73.02 (65.61)
Biochar de cascarilla de arroz	4.27	32.96 (31.55)	30.23(28.93)	32.54 (31.15)
Biochar de pergamino de café	45.79	10.31 (5.58)	5.93 (3.21)	37.97 (20.58)

*Los datos expresados entre paréntesis representan los valores corregidos en base seca

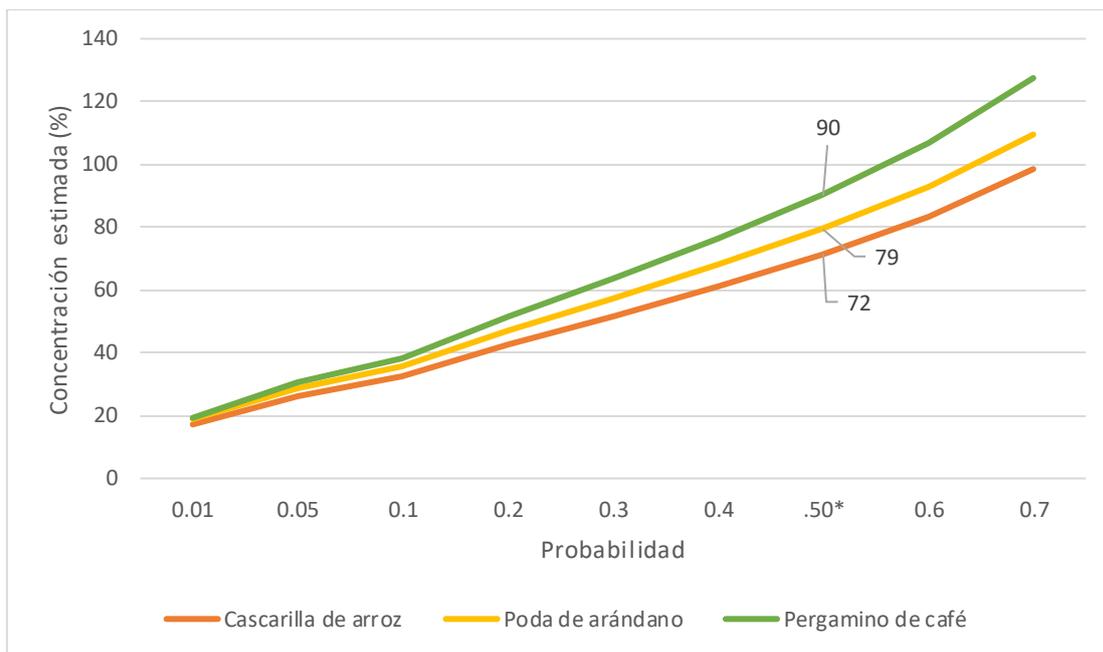
Ensayo de límite de tolerancia media del biochar sobre plántulas de aguaymanto (*Physalis peruviana*)

Mediante el análisis cuantil PROBIT se determinó en las semillas de aguaymanto la toxicidad en función del número de plantas germinadas y muertas asociadas a la dosis de biochar ensayada en cada tipo de biochar (Sánchez *et al.*, 2017). Este es un parámetro importante en la caracterización, que se define como en este caso como límite de tolerancia media (LTM) (Trujillo, 2017).

Las propiedades físicas, químicas y estructurales del biochar causaron niveles relativamente altos de mortalidad y sobrevivencia de las plántulas de aguaymanto. Como se aprecia en la **Figura 1**, el 50% de la población muere a las concentraciones de 71.5% de biochar de cascarilla de arroz, 79.2% de biochar de poda de arándano y 90.09% de biochar de pergamino de café respectivamente (Tabla 6, Figura 1). Por lo que se demuestra que el biochar proveniente de pergamino de café es menos tóxico y su dosis límite como enmienda es del 90%; sin embargo, dentro de la probabilidad de éxito (plantas sanas al 95%) corresponden dosis que van entre 19% y 30%; lo que corresponde

a la caracterización inicial en el que el pH, contenido de hierro y metales pesados preveían la toxicidad del biochar proveniente de residuos de poda de arándano, pero contrasta con la riqueza en cromo del pergamino de café.

Figura 1. Mortalidad por concentración de biochar adicionado al sustrato



Nota. La probabilidad del 0.50 se toma como referencial para la toxicidad.

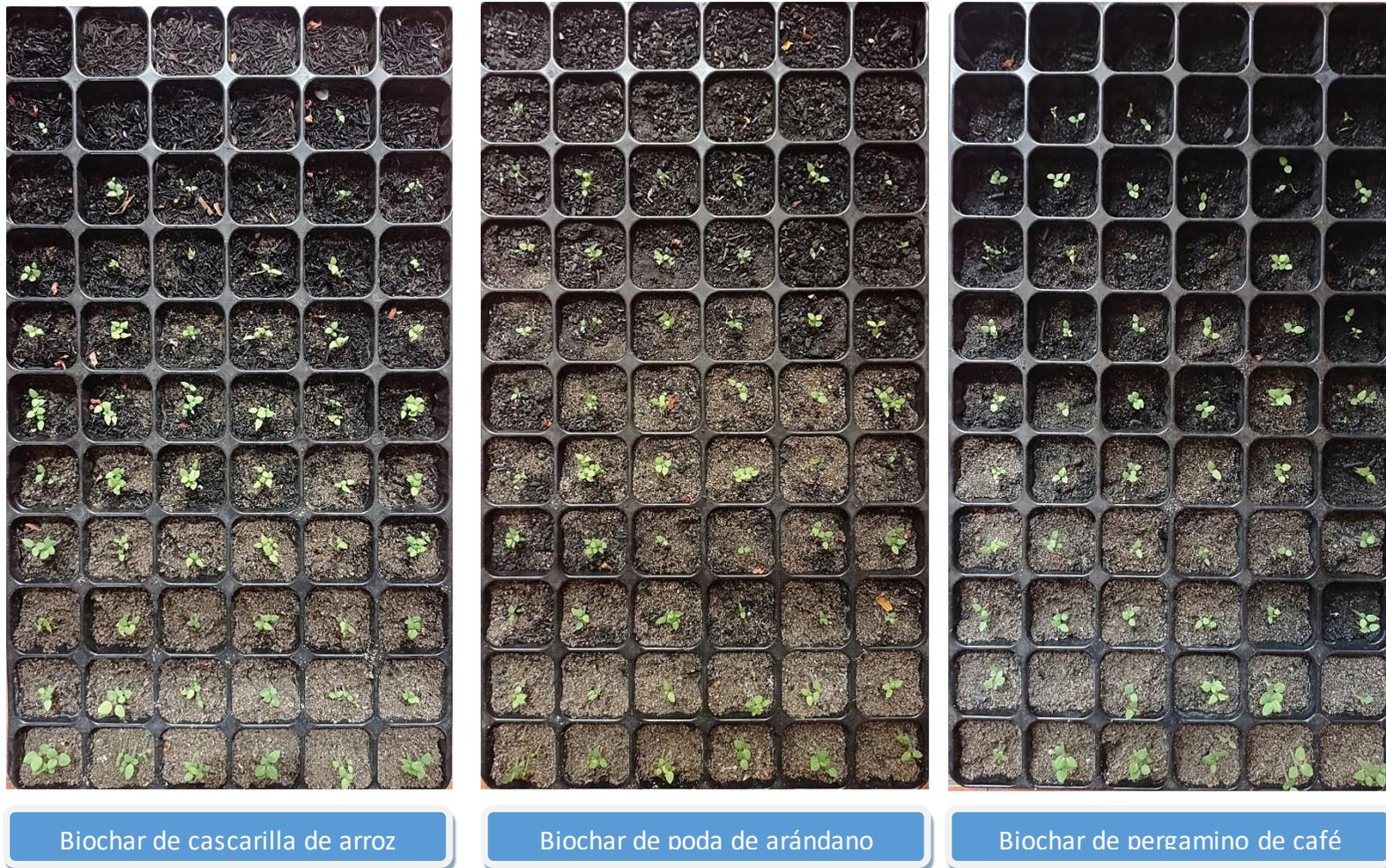


Figura 2. Porcentaje de mortalidad por concentración de biochar adicionado al sustrato

Conclusiones

El biochar proveniente de cascarilla de arroz es más tóxico respecto al biochar proveniente del pergamino de café y residuos de poda del arándano y su dosis límite como enmienda es del 70%; sin embargo, dentro de la probabilidad de obtener plantas sin señales de toxicidad, corresponden dosis que van entre 17% y 26% en mezcla con el sustrato.

Respecto al contenido de nutrientes, el biochar de residuos de poda de arándano destaca por su alto contenido de hierro, cobre, Zn, Mn y B. Además de presentar cantidades importantes de Pb, Cd y Cr. También presenta la más alta cantidad de carbono fijo (81.20%). El biochar de cascarilla de arroz presenta una concentración de sales que le otorgan una CIC importante (19.2 meq/100g) y superior a las otras dos fuentes caracterizadas, del mismo modo su CE es la más baja (2.36 dS/m) lo que lo vuelve apropiado para los cultivos. Presenta la mitad de contenido de hierro aproximadamente en comparación con el biochar de poda de arándano (296 ppm) y es la fuente de menor riqueza en Pb, Cd y Cr.

Acerca de la toxicidad, se concluye que el biochar proveniente de pergamino de café es menos tóxico respecto al biochar proveniente cascarilla de arroz y restos de poda del arándano y su dosis límite como enmienda es del 90%; sin embargo, dentro de la probabilidad de obtener plantas sin señales de toxicidad, corresponden dosis que van entre 19% y 30% en mezcla con el sustrato. Se puede afirmar que, aunque el biochar permita el rehúso de elementos orgánicos de la agroindustria, estos deben tratarse como cualquier otro insumo que ingresa al proceso agrícola estableciendo su inocuidad.

ANEXO 1

Imagen: Envió de documento a la revista científica



Referencias bibliográficas

- Abenza, D. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. [Proyecto fin de carrera en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://ddd.uab.cat/record/102163>
- Alvarado-Jaramillo, V. (2019). Impactos antrópicos en agroecosistemas cafetaleros en la selva central del Perú. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 84-100. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/641>
- Angulo, A., y Junior, A. (2018). Evaluación de ceniza de cascarilla de arroz y tipos de agregados finos sobre la compresión, sorbtividad y densidad de morteros de cemento portland tipo I, Trujillo. [Proyecto fin de carrera en Ingeniería Civil, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13124>
- Aróstegui, K. (2019). Evaluación del efecto de biochar de residuos de sachá inchi y cacao sobre suelos degradados de Campoverde, Ucayali, usando Zea mays con indicador. [Proyecto fin de carrera en Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur]. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/762>
- Ávila-Pedraza, E., Sanchez-Reinoso, A., y Restrepo, H. (2020). Use of Biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2). Biochar Conference, Boulder, Colorado, 36. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>
- Balta, R. (2019). El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (*Solaneum lycopersicum* L.) bajo el invernadero. [Proyecto fin de carrera en Ingeniería Agrónoma, Universidad Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4568/dionisio-flores-erick-edinson.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bashir, S., Shaaban, M., Mehmood, S., Zhu, J., Fu, Q., & Hu, H. (2018). Efficiency of C3 and C4 plant derived-biochar for Cd mobility, nutrient cycling and microbial biomass in contaminated soil. *Bulletin of environmental contamination and*

- toxicology*, 100(6), 834-838. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00128-018-2332-6>
- Bruun, S., El-Zahery, T., & Jensen, L. (2009, February). Carbon sequestration with biochar—stability and effect on decomposition of soil organic matter. In *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science* 6,24. <https://www.proquest.com/openview/e4b6eb83a3116d2628e35915a1d9a975/1?pq-origsite=gscholar&cbl=4998669>
- Cairo, P., Alvares, O., Rodríguez, A., Mollineda, Á., Torres, P., & Rodríguez López, O. (2018). La biomasa de *Bambusa vulgaris* como alternativa para la recuperación de suelos degradados. *Centro Agrícola*, 45(3), 51-58. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000300051
- Campos, P., Miller, A. Z., Knicker, H., Costa-Pereira, M. F., Merino, A., & De la Rosa, J. M. (2020). Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. *Waste Management*, 105, 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>
- Centro Tecnológico de la Energía y el Medio Ambiente. (2018). Estudio del estado del arte de alternativas de valorización de productos de pirólisis. <https://www.cetenma.es/wp-content/uploads/2018/12/EEA-Alternativas-valorizaci%C3%B3n-productos.pdf>
- Corredor, Y. & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Cuenca, J. (2019). Evaluación de la mineralización de biochar sobre parámetros químicos del suelo en dos tiempos de incubación. [Proyecto fin de carrera en Ingeniería Agrónomica, Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15160>

- De Melo, A., Fernandes, P., De Melo, C., De Souza, E., Guimarães, R., De Melo, A., & Seleguini, A. (2020). Substrates and organic sources for *Physalis peruviana* L. seedling production. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(3), 314-323.
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortico las/article/view/8825
- Diario Gestión (2021). Exportaciones peruanas de arándanos seguirán al alza en campaña 2021-2022 Disponible en: <https://gestion.pe/economia/exportaciones-peruanas-de-arandanos-organicos-casi-se-triplicarian-en-la-campana-20212022-noticia/>
- Díaz, C. (2017). Uso de biochar de acícula de pino (*Pinus patula*) como enmienda de suelo negro andino (Andosol). [Master's thesis, Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6828>
- Díaz, J. (2019). Propiedades del concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ en estado fresco al adicionarle biocarbon de aserrín en 5%, 7.5% y 10%. [Trabajo de Fin de Carrera en Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo].
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51731>
- Duku, M., Gu, S., & Hagan, E. (2011). Biochar production potential in Ghana—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3539-3551.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.010>
- Ennis, C. J., Evans, A. G., Islam, M., Ralebitso-Senior, T. K., & Senior, E. (2012). Biochar: carbon sequestration, land remediation, and impacts on soil microbiology. *Critical reviews in environmental science and technology*, 42(22), 2311-2364. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574115>
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000300367&script=sci_arttext

- Escudero, A. (2019). Alternativas ambientales para el aprovechamiento de la biomasa residual de palma aceitera (*elaeis guineensis*) en procesos industriales y agrícolas. *Publicaciones e Investigación*, 1. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/29643>
- Fan, R., Zhang, B., Li, J., Zhang, Z., & Liang, A. (2020). Straw-derived biochar mitigates CO₂ emission through changes in soil pore structure in a wheat-rice rotation system. *Chemosphere*, 243, 125329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125329>
- Fiallos, L., Flores, L., Duchi, N., Flores, C., Baño, D., & Estrada, L. (2015). Restauración ecológica del suelo aplicando biochar, y su efecto en la producción de *Medicago sativa*. *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 13-20. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_agricultura/article/view/4349
- Galera, A., Almagro, M., & Gómez, M. (2014). Biorresiduos: gestión y alternativas de utilización. Fundación CONAMA, Madrid. <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711352.pdf>
- Galindo, L., Alatorre Bremont, J., y Reyes, O. (2015). Adaptación al cambio climático a través de la elección de cultivos en Perú. *El trimestre económico*, 82(327), 489-519. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-718X2015000300489&script=sci_arttext
- Gallo, M., Lugo, L., & Zapata, R. (2018). Evaluación de biochar como alternativa de sustrato en cultivos de tomate. *Scientia et Technica*, 23(2), 299-303. <https://doi.org/10.22517/23447214.17691>
- García, J., y González, S. (2018). Germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*), papaya (*Carica papaya* L.) y maracuyá (*Passiflora edulis*) utilizando sustratos orgánicos. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 9(2), 18-35. <https://revistas.unillanos.edu.co/index.php/sistemasagroecologicos/article/view/715>

- García-Jaramillo, M. (2015). Aplicación de enmiendas orgánicas y biochars derivados de la industria oleícola en el cultivo del arroz: influencia en la dinámica de plaguicidas y en propiedades agronómicas. <https://core.ac.uk/download/pdf/51393427.pdf>
- Gay, L. (2015). Orgánica del suelo en el secuestro de carbono. biochar, una estrategia potencial. [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/LAURA%20MILIAN%20GAY.pdf>
- Godlewska, P., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2021). The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of hazardous materials*, 403, 123833. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123833>
- Gómez, N. (2017). Valorización de biomásas residuales mediante el proceso de pirólisis para producción de biochar y biocombustibles. <https://buleria.unileon.es/handle/10612/5880>.
- Gómez, L. A., Cruz-Dominguez, A., Jiménez-Madrid, D., Ocampo-Duran, Á., & Parra-González, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349.
- González, S., García, J., & Hernández, J. (2019). Crecimiento y desarrollo inicial de semillas hortícolas sembradas en mezclas de suelo con bio-carbón. *MAGISTRA*, 30, 259-267. <https://magistraonline.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/576>
- Guerra, P. (2015). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana. [Trabajo de Fin de Carrera en Ingeniería Ambiental, universidad Nacional Agraria la Molina] <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/1895/Q70.G84-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Iglesias-Abad, S., Alvarez-Vera, M., Vázquez, J., & Salas, C. (2020). Biochar de biomasa residual de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) mediante dos métodos de pirólisis. *Manglar*, 17(2), 105-111. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.016>
- Jiang, J., Zhang, L., Wang, X., Holm, N., Rajagopalan, K., Chen, F., & Ma, S. (2013). Highly ordered macroporous woody biochar with ultra-high carbon content as supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, 113, 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.09.121>
- Jiang, X., Haddix, M. L., & Cotrufo, M. F. (2016). Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition: Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 100, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.05.020>
- Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of environmental management*, 227, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.082>
- Khawkomol, S., Neamchan, R., Thongsamer, T., Vinitnantharat, S., Panpradit, B., Sohsalam, P., & Mrozik, W. (2021). Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management. *Sustainability*, 13(15), 8147. <https://doi.org/10.3390/su13158147>
- Kwapinski, W., Byrne, C. M., Kryachko, E., Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J. J., & Hayes, M. H. (2010). Biochar from biomass and waste. *Waste and Biomass Valorization*, 1(2), 177-189. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9024-8>
- Kraska, P., Andruszczak, S., Oleszczuk, P., Świeca, M., Kwiecińska-Poppe, E., Gierasimiuk, P., ... & Pałys, E. (2018). The content of elements and quality parameters of winter rye grain as influenced by biochar-amended soil. *Zemdirbyste-Agriculture*, 105(1).
- Lara, N., Figueroa, L., Carvajal, F., Zapata, Y., Urbina, C., & Escobar, H. (2013). Diferenciación cuantitativa entre el carbono orgánico del suelo y el carbono del

- biochar en suelos áridos. *Ciencia e investigación agraria*, 40(2), 387-395.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202013000200013>
- Lefebvre, D., Williams, A., Meersmans, J., Kirk, G. J., Sohi, S., Goglio, P., & Smith, P. (2020). Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. *Scientific reports*, 10(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-76470-y>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 312, 123614.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- Liu, H., Qin, S., Sirohi, R., Ahluwalia, V., Zhou, Y., Sindhu, R., & Awasthi, M. K. (2021). Sustainable blueberry waste recycling towards biorefinery strategy and circular bioeconomy: A review. *Bioresource Technology*, 125181.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125181>
- López, R. (2018). Nuevas enmiendas en agricultura y la mitigación de los efectos del cambio global. <https://digital.csic.es/handle/10261/171620>
- Martí, E., Sierra, J., Domene, X., Mumburí, M., Cruañas, R., & Garau, M. A. (2021). One-year monitoring of nitrogen forms after the application of various types of biochar on different soils. *Geoderma*, 402, 115178.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115178>
- McElligott, K. M. (2011). Biochar amendments to forest soil: Effects on soil properties and tree growth. M.Sc. [Thesis, College of Graduate Studies, University of Idaho, USA].
https://forest.moscowfs1.wsu.edu/smp/solo/documents/GTs/McElligott-Kristin_Thesis.pdf
- McLaughlin, H; Anderson, PS; Shields, FE; Reed, TB. 2009. All Biochars are not Created Equal and How to Tell them Apart, in: 2. Presented at the North America Biochar Conference, Boulder, Colorado, p. 36.
<http://biochar.bioenergylists.org/files/All-Biochars--Version2--Oct2009.pdf>

- Méndez, A. (2017). Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25146>
- Medina, J., Monreal, C., Barea, J. M., Arriagada, C., Borie, F., & Cornejo, P. (2015). Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: A review. *Waste Management*, 42, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.002>
- Mendoza, A. (2019). Compost y biochar en la producción y calidad de Vainita (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Jade en La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4140>
- MIDAGRI (2020). Observatorio de commodities: café. boletín de publicación trimestral octubre-diciembre. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1949934/Commodities%20Caf%C3%A9%20oct-dic%202020.pdf>
- MIDAGRI (2021). Observatorio de commodities: arroz. Boletín de publicación trimestral N° 01-2021. Boletín de publicación trimestral n. 01-2021. Disponible en <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1912919/Commodities%20arroz%20ene-mar%202021.pdf.pdf>
- Montero, R. G., Medina, P. P., Rastrero, M. R., Herráiz, M. J. S., Guirado, M., & Torres, R. M. G. (2021). Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo. *Técnica Industrial*, 328, 44-53. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/118/7613/a7613.pdf>
- Moreno, F., Díaz, V., Acosta, F., Faz, Á., & Zornoza, R. (2015). Influencia de la temperatura y del tiempo de pirólisis en la hidrofobicidad de biocarbón obtenido a partir de purín porcino. *Nitrogen and Carbon dynamics in soil. International Journal of Advanced Biological Research* 2: 249–255.
- Oh, T. K., Choi, B., Shinogi, Y., & Chikushi, J. (2012). Characterization of biochar derived from three types of biomass. https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_detail_md/?lang=0&amode=MD100000&bibid=22049

- Parra, P. (2016). Evaluación del uso de residuos orgánicos para la producción de biochar y su aplicación como enmienda orgánica. [Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/44393/1/PAOLA_ANDREA_CELY_PARRA.pdf
- Pradhan, S., Abdelaal, A. H., Mroue, K., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., & McKay, G. (2020). Biochar from vegetable wastes: agro-environmental characterization. *Biochar*, 2(4), 439-453. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00069-9>
- Quintero, F., Amador, U., & Isac, R. (2019). Evaluación del efecto de cascarilla de arroz carbonizada en propiedades físicas y retención de nitrógeno en el suelo, Santa Adelaida, Estelí, 2018. [Tesis Doctoral, Universidad Católica del Trópico Seco]. <http://repositorio.ucatse.edu.ni/44/>
- Quirantes, M. (2016). Propuesta para la reutilización agrícola de las cenizas generadas en la obtención de energías renovables a partir de biomasa residual. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=57768>
- Rathinavelu, R., & Graziosi, G. (2005). Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. Organización Internacional del Café, ITA. <http://ciberinnova.edu.co/archivos/plantilla-ovas1-slide/documents-UCN-Canvas/impacto-ambiental/Unidad%202/5.%20Usos%20residuos%20del%20cafe.pdf>
- Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Pacheco, E. V., & Barra, J. D. E. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Revista terra latinoamericana*, 34(3), 367-382. <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/155>
- Rodríguez, O., & Rodríguez, A. (2002). Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando Acetato de Amonio, Acetato de Sodio y Cloruro de Amonio. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19(4), 253-263.

- Rosas, J. (2015). Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirólisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible. <https://buleria.unileon.es/handle/10612/4246>
- Sabino, D. (2020). Determinación de los niveles de enmiendas para la remediación de suelos contaminados con Cadmio (Cd) en el cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) distrito de San Alejandro, Ucayali, Perú.
- Salgado, M. A. H., & Tarelho, L. A. (2020). Simultaneous production of biochar and thermal energy using palm oil residual biomass as feedstock in an auto-thermal prototype reactor. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121804. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121804>
- Sánchez-Vázquez, E. P., Osorio-Osorio, R., Hernández-Hernández, L. U., Hernández-García, V., Márquez-Quiroz, C., & Cruz-Lázaro, E. D. L. (2017). Toxicidad de acaricidas para el ácaro rojo de las palmas *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae). *Agrociencia*, 51(1), 81-90. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000100081&script=sci_arttext
- Shenbagavalli, S., & Mahimairaja, S. (2012). Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil. *International journal of advanced biological research*, 2(2), 249-255.
- Sørmo, E., Silvani, L., Thune, G., Gerber, H., Schmidt, H. P., Smebye, A. B., & Cornelissen, G. (2020). Waste timber pyrolysis in a medium-scale unit: Emission budgets and biochar quality. *Science of the Total Environment*, 718, 137335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137335>
- Stewart, C. E., Zheng, J., Botte, J., & Cotrufo, M. F. (2013). Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *Gcb Bioenergy*, 5(2), 153-164. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12001>
- Suárez, F. (2018). Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador utilizando cáscara de café. [Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería]

Mecánica-Eléctrica, Universidad de Piura].
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3823>

Sun, X., Shan, R., Li, X., Pan, J., Liu, X., Deng, R., & Song, J. (2017). Characterization of 60 types of Chinese biomass waste and resultant biochars in terms of their candidacy for soil application. *Gcb Bioenergy*, 9(9), 1423-1435.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12435>

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Torres, G., Ortiz, O., Ubalde, J., Sort, X., & Alcañiz, J. (2014). El biocarbón (biochar): una forma de secuestrar carbono y de transferir menos contaminantes al subsuelo y acuíferos. *Jornades Ambientals sobre Contaminació d'Aigua del Subsòl*, 1, 40037.
http://www.jornadesambientals.com/uploads/2/3/9/7/23973214/_el_biocarb_n_biochar_una_forma_de_secuestrar_el_carbono_y_de_transferir_menos_contaminantes_al_subsuelo_y_acuferos_1.pdf

Trujillo, E., Valencia, A., y Cecilia Alegría, M. (2019). Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 489-504.
<http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.262>

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).
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/183>

Velázquez Machuca, M. A., Equihua Soriano, J. R., Venegas González, J., Montañez Soto, J. L., Pimentel Equihua, J. L., & Muñoz Navia, M. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 243-251.

- Velázquez, J., Juárez, P., Anzaldo, J., Alejo, G., Valdez, L., Alia, I. & Guillén, D. (2019). Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(2), 129-136. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200129
- Villalta, V. & Ortega, E. (2018). Diferencias de parámetros físico-químicos de suelos en el proceso de restauración por enmiendas de biochar [Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal Amazónica]. <https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/481>
- Villamagua, M., Valarezo, C., Maza, C., & Valarezo, L. (2017). Efecto del biocarbón, cal y nutrientes sobre el crecimiento de dos especies arbóreas en el ambiente de ladera del Sur de la Amazonia Ecuatoriana. *Bosques Latitud Cero*, 6(1). <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/184>
- Wang, W., Wen, C., Li, C., Wang, M., Li, X., Zhou, Y., & Gong, X. (2019). Emission reduction of particulate matter from the combustion of biochar via thermal pre-treatment of torrefaction, slow pyrolysis or hydrothermal carbonisation and its co-combustion with pulverized coal. *Fuel*, 240, 278-288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.117>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Wen-Tien, T. (2017). Chapter 10 - The potential of pyrolysing exhausted coffee residue for the production of biochar, Editor(s): Charis M. Galanakis, *Handbook of Coffee Processing By-Products*, Academic Press, Pages 299-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00010-4>.
- Winarso, S., Mandala, M., Sulistiyowati, H., Romadhona, S., Hermiyanto, B., & Subchan, W. (2020). The decomposition and efficiency of NPK-enriched biochar addition on Ultisols with soybean. *Sains Tanah-Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 17(1), 35-41. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v17i1.37608>

- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., Shen, M., Tan, C., Zeng, G. and Tan, X. (2021). Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. *Journal of Hazardous Materials*, p.126611. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>
- Xiong, J. (2016). Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (*Paulownia fortunei*). [Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/39861/Tesis%20Jian%20Xiong.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ye, L., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Lehmann, J., Singh, B., & Sabir, M. (2020). Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, 36(1), 2-18. <https://doi.org/10.1111/sum.12546>
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., Boyd, S. E., Yang, H., & Zhang, D. (2016). Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*, 276, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.020>