

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“TIPOS DE BIOCHAR EN LA REMEDIACIÓN DEL CADMIO
EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN INVERNADERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA**

ARACELI YÓSELIN BARZOLA PÉREZ

LIMA – PERÚ

2024

TIPOS DE BIOCHAR EN LA REMEDIACIÓN DEL CADMIO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN INVERNADERO

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	4%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	1%
4	46cncs.cinvestav.mx Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“TIPOS DE BIOCHAR EN LA REMEDIACIÓN DEL CADMIO
EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN INVERNADERO”**

ARACELI YÓSELIN BARZOLA PÉREZ

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Mg. Sc. Ricardo Sevilla Panizo

PRESIDENTE

Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa

ASESOR

Ing. Mg. Sc. Luis Rodrigo Tomassini Vidal

MIEMBRO

Ing. M. Sc. Luis Rubén Bazán Tapia

MIEMBRO

Lima – Perú

2024

DEDICATORIA

A mis padres, Maritza y Lenin, por brindarme siempre su amor y apoyo incondicional, las enseñanzas y la motivación para siempre luchar por mis sueños. Gracias por todo, los amo.

A mis hermanos, Ulises y Julio César, por todo su cariño, confianza y por creer siempre en mí.

A mi recordado abuelito Tadeo, allá en el cielo; y mis amadas abuelitas Fidela y Carmen, por sus cuidados y amor constante.

A mi pequeña sobrina Valentina por motivarme a seguir mejorando día a día.

A toda mi hermosa familia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su amor infinito en cada momento de mi vida. A mis padres, Lenin Barzola Yupanqui y Maritza Pérez Tenorio, por ser el pilar de mi vida y mi motivación para seguir adelante pese a todas las adversidades.

A mi asesor el Dr. Oscar Loli Figueroa, por todas las enseñanzas, consejos, orientación y apoyo brindado en el desarrollo de la presente investigación, así como en mi etapa universitaria.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Agraria la Molina, la Facultad de Agronomía y toda la plana docente, por haber contribuido en mi formación profesional con todos los conocimientos y aprendizajes que he adquirido.

Al Ing. Reynaldo Crespo, el Ing. Edgardo Alaluna y el Ing. Marco Valdivia, por brindarme su apoyo profesional y todas las facilidades en el trabajo para poder culminar la parte experimental y redacción de este trabajo de investigación.

Al Sr. Mario, del laboratorio de fertilidad de suelos, por su buena disposición y apoyo constante brindado en las labores de este trabajo.

A toda mi familia, por ser un soporte esencial en mi vida. En especial, a mis hermanos Julio César y Ulises, mi cuñada Ana Gonzales, mi tía Maria Elena Barzola, mis primas Jacky y Raiza Reyes y mis primos Aldair Crispín y Raúl Fernandezbaca, por confiar en mí siempre.

A Fernando Benites, mi mejor amigo, por su amistad sincera e incondicional, todo su apoyo y motivación en esta y toda nuestra etapa universitaria que es desde donde nos conocemos.

A mis amigas Maria Lucía Vargas y Luciana Sanandres, a quienes quiero como hermanas, por siempre darme aliento, confiar en mí y apoyarme en todo momento.

A Jessenia Melo, Diego Leal y Alexander Oviedo, amigos que me dio la universidad y a quienes agradezco enormemente por su apoyo emocional y consejos todas las veces que lo necesitaba.

A Jonathan Vásquez por sus enseñanzas en el ámbito laboral de la carrera y con el procesamiento de los datos estadísticos de este trabajo.

A mis amigas y amigos de la universidad que me apoyaron de alguna forma en la evolución y desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivo general	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Naturaleza del cadmio	3
2.1.1.	Origen natural	4
2.1.2.	Origen antropogénico	5
2.2.	Dinámica del cadmio en el suelo.....	7
2.2.1.	pH del suelo	7
2.2.2.	Intercambio catiónico:	7
2.2.3.	Contenido de cadmio en el suelo	8
2.2.4.	Temperatura del suelo.....	8
2.2.5.	Contenido de humus y materia orgánica	8
2.2.6.	Calcio.....	9
2.2.7.	Textura del suelo.....	9
2.3.	Cadmio en cultivos agrícolas	9
2.3.1.	Absorción del metal por las plantas.....	9
2.3.2.	Concentración y acumulación en los diferentes órganos vegetales.....	11
2.3.3.	Efectos del Cd en la salud.....	11
2.4.	Biochar	12
2.4.1.	Propiedades del biochar	13
2.4.2.	Características fisicoquímicas del biochar.....	14
2.4.3.	Condiciones de pirólisis.....	16
2.5.	Tipo de biomasa para la producción de biochar	17
2.5.1.	Biochar de cascarilla de arroz.....	19
2.6.	Maíz como cultivo bioindicador.....	21
III.	METODOLOGÍA	23
3.1.	Área de estudio.....	23
3.1.1.	Ubicación geográfica	23
3.1.2.	Clima.....	23
3.1.3.	Características del suelo	24

3.1.4. Material vegetal	26
3.2. Materiales	26
3.2.1. Materiales y equipos	26
3.2.2. Enmiendas orgánicas aplicadas	27
3.3. Metodología.....	28
3.3.1. Procedimientos	28
3.3.2. Parámetros en evaluación	32
3.3.3. Diseño estadístico	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1. Análisis de la aplicación de biochar sobre la producción de materia seca en plantas de maíz	36
4.1.1. Efecto sobre la producción de materia seca en la parte radicular.....	36
4.1.2. Efecto sobre la producción de materia seca en la parte foliar	39
4.1.3. Relación entre materia seca aérea y materia seca radicular sobre la dosis de aplicación de biochar	42
4.2. Efecto de la aplicación de biochar sobre la concentración de cadmio (Cd) en plantas de maíz	44
4.2.1. Efecto sobre la concentración de cadmio en la parte radicular del maíz.....	44
4.2.2. Efecto sobre la concentración de cadmio en la parte foliar del maíz	50
4.2.3. Relación entre la concentración de cadmio aéreo y cadmio radicular sobre la dosis de aplicación de biochar	53
4.3. Efecto residual del biochar en la reducción del cadmio en plantas de maíz	55
4.3.1. Concentración de cadmio (Cd) en la raíz en la segunda campaña de siembra .	55
4.3.2. Concentración de cadmio (Cd) en las hojas en la segunda campaña de siembra:.....	60
4.4. Análisis de absorción de nitrógeno foliar en plantas de maíz	65
4.4.1. Absorción de nitrógeno foliar en la primera campaña.....	65
4.4.2. Absorción de nitrógeno foliar en la segunda campaña.....	72
V. CONCLUSIONES	77
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	80
VIII. ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentraciones de Cd en los diferentes tipos de rocas.....	4
Tabla 2: Valores de los principales constituyentes de la cascarilla de arroz.....	20
Tabla 3: Propiedades fisicoquímicas de los dos tipos de biochar a investigar	21
Tabla 4: Datos hidrometeorológicos de La Molina (enero a mayo del 2019).....	24
Tabla 5: Características físico-químicas del suelo utilizado en el experimento.....	25
Tabla 6: Características generales de las enmiendas preparadas y en prueba	27
Tabla 7: Descripción de los tipos de biochar y las dosis empleadas en la investigación	31
Tabla 8: Efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro diferentes dosis sobre la producción de materia seca de las raíces (g de MS.maceta ⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra	38
Tabla 9: Efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro diferentes dosis sobre la producción de materia seca de las hojas (g de MS.maceta ⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra	41
Tabla 10: Relación entre la producción de materia seca en la parte aérea y la parte radicular en plantas de maíz	43
Tabla 11: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio radicular (mg Cd.kg ⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra .	45
Tabla 12: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio foliar (mg Cd.kg ⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra.....	50
Tabla 13: Relación entre las concentraciones de cadmio en la parte aérea y la parte radicular en plantas de maíz	54
Tabla 14: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio radicular (mg Cd.kg ⁻¹) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra.	57
Tabla 15: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio foliar (mg Cd.kg ⁻¹) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra	62
Tabla 16: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de nitrógeno foliar (mg N.maceta ⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra.....	67
Tabla 17: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de nitrógeno foliar (mg N.maceta ⁻¹) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Beneficios del uso de biochar	14
Figura 2: Representación simple del proceso de pirólisis	16
Figura 3: Ubicación del Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM	23
Figura 4: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la producción de materia seca de las raíces de las plantas de maíz.....	37
Figura 5: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la materia seca de la raíz de las plantas de maíz	37
Figura 6: Efecto de los tipos de enmienda y dosis aplicadas sobre la producción de materia seca de las raíces de las plantas de maíz.....	38
Figura 7: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz.....	40
Figura 8: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz.....	40
Figura 9: Efecto de los tipos de enmienda y dosis aplicadas sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%	41
Figura 10: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz.....	46
Figura 11: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz	46
Figura 12: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz.....	51
Figura 13: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz	51
Figura 14: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la segunda campaña.....	57
Figura 15: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la segunda campaña	58
Figura 16: Comparación entre la concentración de cadmio en las raíces entre la primera y segunda campaña. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%	60

Figura 17: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña.....	62
Figura 18: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña	63
Figura 19: Comparación entre la concentración de cadmio en las hojas entre la primera y segunda campaña. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%	64
Figura 20: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz	67
Figura 21: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz	68
Figura 22: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña	74
Figura 23: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Datos de materia seca (g.maceta ⁻¹) de raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña.....	89
Anexo 2: Datos de materia seca (g.maceta ⁻¹) de raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña.....	90
Anexo 3: Concentración de cadmio (mg.kg ⁻¹) en raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña.....	91
Anexo 4: Concentración de cadmio (mg.kg ⁻¹) en raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña.....	92
Anexo 5: Contenido de nitrógeno (mg N.planta ⁻¹) en hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña.....	93
Anexo 6: Contenido de nitrógeno (mg N.planta ⁻¹) en hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña.....	94
Anexo 7: Prueba estadística para los datos obtenidos de la producción de materia seca radicular en la primera campaña.....	95
Anexo 8: Prueba estadística para los datos obtenidos de la producción de materia seca foliar en la primera campaña.....	97
Anexo 9: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio radicular en la primera campaña.....	99
Anexo 10: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio foliar en la primera campaña.....	101
Anexo 11: Análisis de regresión lineal entre la concentración de cadmio foliar y la concentración de cadmio radicular y su relación con la dosis de biochar aplicado.....	103
Anexo 12: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio radicular en la segunda campaña.....	104
Anexo 13: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio foliar en la segunda campaña.....	106
Anexo 14: Prueba estadística para los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno foliar en la primera campaña.....	108
Anexo 15: Prueba estadística para los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno foliar en la segunda campaña.....	110
Anexo 16: Fotos del ensayo.....	112

RESUMEN

Las altas concentraciones de cadmio presentes en los suelos agrícolas del país están generando grandes limitaciones en la agricultura, viéndose principalmente afectados los cultivos de agroexportación. Esto se debe a los estrictos reglamentos establecidos en los países de destino mediante los que se restringe la entrada de productos agrícolas con altas concentraciones del metal. Por ello, se planteó este ensayo en invernadero, utilizando biochar como enmienda orgánica y su efecto en la disponibilidad de cadmio en suelos contaminados de La Molina utilizando maíz (*Zea mays L.*) como bioindicador. El objetivo principal fue evaluar el efecto de dos tipos de biochar: de cascarilla de arroz y bambú, producidos a 300°C y aplicados en cuatro dosis: 0%, 7.5%, 15% y 30% (%v). Estadísticamente los resultados fueron evaluados siguiendo la distribución en diseño completamente al azar, con análisis factorial de 4 x 2 x 4. Este trabajo se complementó con el análisis del efecto residual de las enmiendas orgánicas. Los resultados mostraron una reducción significativa de la concentración de cadmio en las plantas de maíz por efecto de la aplicación de biochar, siendo el de bambú el más eficiente a una dosis de 15%, mostrando valores promedio de 0.31 y 0.34 mg de Cd.kg⁻¹ de raíces y hojas, respectivamente. En cuanto al efecto residual, se observó una acumulación de cadmio en el sistema radicular mayor que en la primera campaña. Por otro lado, ambas enmiendas presentaron efectos positivos sobre la producción de materia seca, así como en la absorción de nitrógeno en las plantas de maíz, siendo más eficiente el tratamiento con biochar de bambú a 7.5%. Se presentaron valores de materia seca de 7.02 y 61.96 g.maceta⁻¹ en raíces y hojas, y valores de absorción de nitrógeno de 1406.94 y 1136.94 mg de N.maceta⁻¹ en la primera y segunda campaña, respectivamente.

Palabras clave: cadmio, biochar, bambú, cascarilla de arroz, maíz, adsorción.

ABSTRACT

The high concentrations of cadmium present in the agricultural soils of the country are generating great limitations in agriculture, affecting mainly agro-export crops. Agricultural products with high concentrations of this metal cannot enter the countries of destination due to their regulations regarding Cd concentration thresholds. Thus, the purpose of this greenhouse investigation was to evaluate the effects of the organic amendment biochar on the availability of cadmium from contaminated soils from La Molina using maize (*Zea mays* L.) as a bio-indicator. The main objective of this investigation was to evaluate the effect of two types of biochar. The first one produced from rice husks and the second one produced from bamboo, each one burnt at 300°C. Four application rates were applied with each type of biochar: 0%, 7.5%, 15%, and 30% (v%). The study was conducted in a factorial arrangement of eight treatments with four replications (pots) per treatment. The pots were distributed in a Completely Randomized Design. A subsequent crop was also evaluated to assess the residual effect of the treatments. The results showed that biochar applications significantly decreased Cd concentration in maize roots and leaves with bamboo biochar at 15% being the most efficient, showing average concentrations of 0.31 mg Cd.kg⁻¹ and 0.34 mg Cd.kg⁻¹ in roots and leaves, respectively. Regarding the residual effect of the biochar application an increase of Cd concentration in roots was observed in the second crop. Concerning dry weight and nitrogen absorption, both amendments presented positive effects on the plants of the study, being bamboo biochar at 7.5% more efficient than the other treatments. Plants showed averages of 7.02 g.pot⁻¹ and 61.96 g.pot⁻¹ in dry weight of roots and leaves, and 1406.94 mg N. pot⁻¹ and 1136.94 mg N. pot⁻¹ in nitrogen absorption in the first and second yield, respectively.

Key words: cadmium, biochar, bamboo, rice husk, maize, adsorption.

I. INTRODUCCIÓN

El cadmio es conocido por ser altamente tóxico y el causante de graves problemas de salud en nuestro organismo, siendo considerado como un elemento pre-cancerígeno. Este efecto ha repercutido en la comercialización de los productos agroexportables, pues este elemento pesado es considerado un elemento limitante en su comercialización hacia los diferentes mercados externos, al establecer niveles de concentración críticos para su aceptación en el ingreso a los mercados europeos y americanos principalmente; siendo estos niveles cada vez más exigentes. En dicha norma se exige límites de cadmio, en un rango de entre 0.05 mg/kg (pulpa de palta) y 0.80 mg/kg para la comercialización de productos como el pimiento (Melgarejo, 2019), espárrago y cacao, por lo que están expuestos a pérdidas económicas por este aspecto.

Actualmente uno de los cultivos afectados es el cacao, por el que se están teniendo muchos inconvenientes en la exportación, debido a las restricciones impuestas por el Codex Alimentario y la Unión Europea en su Reglamento 488/2014. Debido a dicho problema, muchos de los agricultores en el país han empezado a mostrar preocupación y buscar soluciones rápidas. Se han visto casos en los que los agricultores han comenzado a cambiar algunos de sus cultivos en el campo, como por ejemplo es el caso de varios agricultores en Piura donde existen alrededor de 500 hectáreas de cacao, las cuales empezaron a reducirse por el problema mencionado (Ortiz, 2018).

El cadmio es un elemento presente en el suelo, que se encuentra principalmente en las rocas ígneas, por lo que la investigación está centrada principalmente en la reducción en su absorción por parte de la planta. Por ello, diferentes instituciones están probando con especies o variedades que presenten menores absorciones de cadmio o que puedan reducir su absorción a través de la rizósfera; así como también se está probando con la capacidad del suelo de retener el cadmio con una determinada fuerza, de manera que la planta no lo pueda absorber, para ello se plantea el uso de materias orgánicas del tipo coloidal.

En el presente trabajo se plantea estudiar la respuesta de la aplicación de materias orgánicas complejas en la reducción de la absorción de cadmio por las plantas. Debido a su heterogeneidad, no todas las materias orgánicas que se adicionan a los suelos presentan este efecto o presentan un efecto diferente en su relación con la retención del cadmio. Por ello, específicamente se plantea realizar una investigación sobre el efecto del uso del biochar como enmienda para encontrar una alternativa al problema relacionado al cadmio y generar un aporte en la agricultura.

1.1. Objetivo general

Determinar el efecto diferencial del biochar producido a partir de diferentes fuentes vegetales como fuente de materia prima, en la bioacumulación de cadmio en plantas de maíz.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto del biochar en la reducción de la absorción de cadmio.
- Evaluar el efecto del biochar en la producción de materia seca del maíz.
- Determinar la relación entre la aplicación de biochar y la absorción de nitrógeno en plantas de maíz.
- Determinar el efecto residual del biochar en la materia seca y reducción del cadmio en plantas de maíz.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Naturaleza del cadmio

Naturalmente el cadmio (Cd) se presenta en el suelo en concentraciones más bajas a 1 mg Cd/kg, y de manera general con valores entre 0.15 y 0.2 mg Cd/kg, por lo que valores mayores a este causan problemas de toxicidad tanto en la planta como en los seres humanos que las consumen (Abanto, 2016). La alta toxicidad y sobre todo su gran solubilidad en agua, lo vuelven uno de los contaminantes más nocivos en el suelo, por los efectos que genera y su fácil disponibilidad a ser absorbido (Wang, Zou, Duan, Jiang & Liu, 2007).

Abanto (2016) indica que por el grupo químico al que pertenece, tiene propiedades que son similares a las del calcio y zinc, por lo mismo que podría existir un tipo de competencia con estos elementos en el suelo. Además, por su naturaleza como metal pesado, el cadmio posee características relacionadas a todo tipo de contaminante en el suelo, lo que genera preocupación en el comportamiento que tiene:

- Su concentración mayormente se mantiene casi constante, por el carácter acumulativo que posee.
- Se encuentra presente en el suelo, y su origen en mayor porcentaje es debido a los procesos geoquímicos que ocurren en la roca madre con el tiempo.
- Altos valores de concentración del metal en el suelo resultan ser tóxicos para los seres vivos. Las plantas lo absorben y acumulan en su estructura, la misma que sirve de alimento para muchos mamíferos, incluyendo el ser humano.
- Principalmente se presenta en forma catiónica, por lo que su interacción con el suelo es muy afín a su matriz y su capacidad de intercambio catiónico.

El comportamiento del cadmio en el suelo se relaciona directamente a los diversos procesos que ocurran en él, tanto químicos, físicos y biológicos. Así, este metal pesado se puede encontrar adsorbido en el complejo de cambio del suelo o formando precipitados o complejos al reaccionar con otros elementos. Sin embargo, su forma tóxica resulta cuando

el metal se encuentra disponible, es decir es soluble y de fácil absorción para las plantas. Por todo ello, para poder conocer el comportamiento específico del elemento es importante tener en cuenta las propiedades del suelo en estudio y también enfocarse en su origen, el mismo que puede ser de dos tipos: de forma natural o por causa del ser humano (Huaynates, 2013).

2.1.1. Origen natural

De forma natural, el suelo tiene muchos procesos de formación que son los que determinan sus características, así como su composición física y química. Es por ello que la composición de la roca madre y la meteorización de los diferentes minerales son los principales factores que influyen en la concentración de los metales pesados en el suelo (Abanto, 2016).

Según Smolders & Mertens (2013), existen solo pocos minerales que contienen Cd, como la greenockita o sulfuro de cadmio (CdS), el óxido de cadmio (CdO) y la otavita o carbonato de cadmio (CdCO₃). Comúnmente el cadmio resulta ser un subproducto del zinc (Zn). Por ende, este metal es más común en minerales que tienen zinc como la esfalerita o blenda (ZnS), donde se estima que el metal pesado alcanza hasta un 0.8% de su composición. De acuerdo con los procesos de formación del suelo, la concentración de cadmio en los diferentes tipos de roca varía dependiendo de su naturaleza, origen, edad y lugar de procedencia, lo que quiere decir que no será la misma en todas las zonas de estudio. Aun así, generalmente la mayor proporción de cadmio se presenta en rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas, considerando ese orden, y su presencia en éstas se relacionan directamente con las concentraciones de fósforo, azufre y carbono que tengan.

Tabla 1: Concentraciones de Cd en los diferentes tipos de rocas

Rocas	Concentraciones de Cd (mg Cd / kg de roca)
Igneas	0.07 - 0.25
Metamórficas	0.11 - 1.00
Sedimentarias	0.01 - 2.60

FUENTE: Adaptado de Cadmium. Smolders & Mertens (2013)

El factor natural predominante de su presencia en el suelo es la roca madre desde la cual se origina. El cadmio resultante de la meteorización, al tener baja movilidad, termina siendo adsorbido por las arcillas o materia orgánica que el suelo presenta por el mismo proceso de

formación que ha tenido (García, 1989).

2.1.2. Origen antropogénico

Diversas actividades del hombre son fuente de contaminación del medio ambiente por metales pesados. Principalmente se menciona a la actividad industrial y la minería como las que han logrado incrementar la concentración de estos elementos en el suelo con el paso del tiempo (Pinto *et al.*, 2003).

Una parte de la presencia de cadmio en el suelo se explica por origen natural, pero un mayor porcentaje se debe a un número de fuentes externas, cuyo principal origen es antropogénico (Alloway & Steinnes, 1999). De manera general, existen diversas actividades y fuentes que generan la contaminación con Cd en el suelo. Para mencionar algunas de ellas, se tienen: los focos emisores aéreos, diferentes productos de aplicaciones agrícolas (fertilizantes y plaguicidas), aguas de riego, uso de lodos residuales como abono, o por residuos de fuentes de contaminación industrial y urbana (García, 1989).

Actualmente, la concentración de cadmio en los suelos ha aumentado en comparación con los suelos inmaculados, lo que se debe principalmente a su incorporación por medio de fertilizantes fosfatados (Smolders & Mertens, 2013). Sin embargo, como existen otras fuentes de contaminación del metal, es importante hacer una breve explicación de cada una, como se tiene a continuación (Alloway & Steinnes, 1999):

a. Emisiones gaseosas a la atmósfera: las diferentes formas de cadmio en las partículas suspendidas en la atmósfera se presentan en diferentes formas químicas. Esta concentración de cadmio tiene prevalencia dependiendo de su tamaño y las condiciones climáticas del lugar, siendo un promedio de tiempo entre 1 a 4 semanas, luego de las cuales las partículas con el metal pesado se depositan en el suelo por las vías húmeda y vía seca. Las principales fuentes de emisiones del metal pesado a la atmósfera son los procesos industriales que incluye la producción de metales como el plomo, zinc, cobre y otros obtenidos como subproducto de la minería; producción de hierro y acero; combustión de combustible fósil; incineradoras municipales; entre otros. La concentración en el suelo del cadmio depositado por la atmósfera, va a variar dependiendo

del tipo y las características del suelo.

- b. Fuentes de aplicación directa al suelo:** existen diversas fuentes que generan la entrada directa de cadmio a los suelos, debido a que estas presentan este metal pesado de forma secundaria en su composición. Algunos de estos materiales son: los fertilizantes (principalmente los fosfatados), aguas y lodos residuales y compost derivados de residuos municipales.
- Fertilizantes: principalmente se da por el uso de fertilizantes fosfatados, los que se producen a partir de la roca fosfórica. La presencia del Cd en la apatita u otras rocas fosfóricas se debe al reemplazo de los iones Ca^{2+} que tiene en su estructura, por iones Cd^{2+} . La concentración de cadmio en las diferentes fuentes de fertilizantes va a depender del tipo de fertilizante, la fuente de roca fosfatada usada para su producción y la cantidad aplicada al suelo. Este tipo de productos son los que constituyen más del 50% del total de la entrada de cadmio en los suelos que, aunque realiza pequeñas adiciones, la preocupación está a largo plazo, pues el contenido de cadmio se va concentrando en el suelo hasta tener un exceso de los valores permisibles en los cultivos agrícolas que lo absorben (De Meeûs, Eduljee & Hutton, 2002). Es por ello, que las diferentes empresas dedicadas a la producción de estos productos agrícolas, están buscando diversas soluciones para poder reducir la concentración de cadmio en dichas enmiendas. Por lo que hoy en día se están produciendo muchos fertilizantes con baja concentración de cadmio en su composición, además de que se realiza una búsqueda continua de rocas con bajo nivel de este metal pesado, lo que aún resulta un poco difícil por las mismas características químicas de la roca fosfórica (Abanto, 2016). A pesar de eso, es importante que se siga creando nuevas soluciones para regular este problema, como una prioridad.
 - Lodos residuales: se refiere a aquellos residuos sólidos que quedan luego de haber pasado por muchos procesos dentro del tratamiento de aguas de uso municipal o industrial. Los residuos resultantes de todo este proceso pueden ser depositados al suelo como enmienda, liberados a algún cuerpo de agua (ríos o mares), en un vertedero o ser incinerados. El problema trasciende en que este producto, suele tener dentro de su composición metales pesados, siendo uno de ellos el cadmio, dependiendo de la fuente de la cual proviene. Es así como llega a contaminar el suelo con el metal pesado.

c. Contaminación accidental: ocurre debido a la deposición de residuos en tierras por procesos como minería, industria, plantas químicas, corrosión de estructuras, etc.

2.2. Dinámica del cadmio en el suelo

Por su estructura, se puede clasificar al cadmio como un ion medio, que es muy selectivo en su superficie de atracción, lo que lo hace muy afín a las partículas del suelo u otro tipo de coloide. Su persistencia en estas partículas es muy constante y, como parte de su naturaleza, una fracción baja del metal se encuentra en la solución suelo; aun así, su disponibilidad para ser absorbido se mantiene por tiempo prolongado, aunque esto dependerá de las características que presente el suelo (Smolders & Mertens, 2013).

Son muchos los factores que determinan la presencia de cadmio disponible en la solución suelo y la adsorción del mismo por el complejo arcillo-húmico. De acuerdo con Sánchez (2016), se determina de forma general que el cadmio presenta mayor adsorción en suelos con mayor contenido de materia orgánica, textura más fina, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de aluminio intercambiable. A continuación, se explicará con mayor detalle, los factores que determinan la disponibilidad del cadmio en el suelo.

2.2.1. pH del suelo

La disponibilidad del cadmio en el suelo está controlada principalmente por el pH, siendo ésta mayor a valores bajos. A pH ácido, este catión no es fuertemente adsorbido por las arcillas y otras partículas, quedándose en mayor proporción en la solución suelo (González, 2010). Mientras que, a pH elevado, el Cd se hace menos disponible por diferentes razones: la formación de complejos hidrox-Cd que poseen menor densidad de carga negativa, así difícilmente ocupan lugar en los complejos de cambio catiónico y precipitan (Naidu, Bolan, Kookana & Tiller, 1994); y por la presencia de carbonatos y fosfatos con los que los iones metálicos de cadmio reaccionan formando complejos que también precipitan (Sánchez, 2016).

2.2.2. Intercambio catiónico

El suelo se define como un cuerpo natural y dinámico que está compuesto por coloides que representan la carga negativa en su superficie, la que le da la característica de adsorber

diferentes cationes que se encuentren en solución, como puede ser el caso del cadmio. Existe cierto tipo de preferencia por la adsorción de algunos cationes sobre otros, lo que explica el antagonismo entre los elementos con la misma cantidad de carga. Si se tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta, existirán más sitios de intercambio y adsorción en la fracción coloidal del suelo, es decir una mayor retención de cualquier tipo de catión (Cárdenas, 2012).

2.2.3. Contenido de cadmio en el suelo

Generalmente funciona como una diferencia de concentraciones, es decir que, si hay mayor concentración de Cd en el suelo, existirá mayor absorción por parte de la planta. Sin embargo, este factor no es determinante, debido a que la absorción del metal pesado se da desde la solución suelo y no del complejo de cambio (Abanto, 2016).

2.2.4. Temperatura del suelo

La relación con la temperatura es directamente proporcional. Lo que quiere decir que a mayor temperatura existe mayor absorción por parte de las plantas, debido a que con ese parámetro se tiene mayor velocidad de reacciones y mayor solubilidad del catión (Cárdenas, 2012).

2.2.5. Contenido de humus y materia orgánica

Los constituyentes de la materia orgánica son los que le brindan sitios con características para la adsorción de metales como en el caso del cadmio, con ello es que la materia orgánica resulta ser una de las principales fuentes que forman parte de la capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales del suelo. Además, en suelos con alto porcentaje de materia orgánica puede haber presencia de micorrizas, las mismas que favorecen la solubilización de fosfatos y de ese modo contribuyen a la liberación de ciertos cationes como el cadmio (González, 2010).

De forma general, la propiedad de retención de la materia orgánica se debe tanto a su capacidad de intercambio catiónico como a su capacidad quelante, es decir la formación de complejos que puede fomentar la disponibilidad de los metales pesados a ser absorbidos (Adriano, 2001).

2.2.6. Calcio

En el suelo puede haber competencia iónica entre el calcio y el cadmio por su absorción por las plantas, debido a la misma valencia que tienen ambos cationes. Por ende, altas concentraciones de calcio en el suelo reducen la absorción del metal pesado, o viceversa, las altas concentraciones de cadmio reducen la absorción de calcio por las plantas, lo que genera deficiencias de este último catión en hojas y frutos (Cárdenas, 2012).

2.2.7. Textura del suelo

De manera similar a la materia orgánica, la composición granulométrica del suelo actúa en relación a la capacidad de intercambio catiónico que tienen las arcillas. Es decir, a un menor porcentaje de arcilla o en un suelo con textura arenosa, el grado de retención del metal, será menor, debido a que presenta menores sitios de fijación e intercambio (Huaynates, 2013).

2.3. Cadmio en cultivos agrícolas

La principal fuente de contaminación para los humanos es mediante el consumo de productos agrícolas que poseen altas concentraciones del metal, debido a que las plantas de donde derivan se han desarrollado en suelos contaminados con éste. Según la investigación realizada por Sánchez (2016), diferentes cultivos como algunos cereales, vegetales de hoja verde, tubérculos y hortalizas de raíz contienen muy altas concentraciones de cadmio. Aproximadamente el 80% del origen de la toxicidad por la ingesta del metal pesado, proviene de este grupo de alimentos.

2.3.1. Absorción del metal por las plantas

De acuerdo con Balta (2019), el ingreso del cadmio en la raíz no presenta mecanismos de absorción específicos, puesto que no es un elemento esencial en la planta. La entrada de este metal pesado se da en mayor porcentaje de forma pasiva y una pequeña parte metabólicamente. Kabata-Pendias (2011), indica que existen diversos factores en el suelo, como ya se mencionó, que favorecen la disponibilidad del Cd y facilitan su absorción por parte de las plantas. Las condiciones varían en muchos casos, pero en la mayoría se tiene el siguiente estándar: pH ácido del suelo, salinidad alta en el suelo por el elevado contenido de Cl^- que reacciona con el Cd^{+2} y forma compuestos más solubles, textura arenosa o menor porcentaje de arcilla en el suelo, mayor porcentaje de materia orgánica, etc.

Además, este proceso es influenciado por sustancias que se producen en la rizósfera, es decir, los exudados radiculares que son principalmente ácidos orgánicos liberados (carboxilo y amino) los que aumentan la absorción del cadmio. Estas sustancias tienen varios mecanismos para alterar el nivel de iones solubles y la solubilidad de las moléculas en la rizósfera. De forma particular, ocurre que estos ácidos orgánicos de carga negativa reaccionan con las cargas positivas del metal pesado de la solución suelo, modificando su naturaleza química y volviéndolos más disponibles para su absorción por parte de las plantas (Nigam, Srivastava, Prakash & Srivastava, 2001). Por otro lado, las diferentes características de la planta como la especie, edad y desarrollo radicular influyen en la absorción del metal. Aun así, muchas veces se puede observar una mayor concentración de Cd en los tejidos del cultivo a diferencia de lo que hay en el suelo, lo que quiere decir que la entrada del metal pesado a las plantas se realiza con facilidad (Fergusson, 1990).

En la investigación realizada por Abanto (2016), se afirma que el Cd es absorbido y retenido en mayor proporción en la vacuola de las células de la raíz, lo que hace que solo una pequeña porción pase a la parte aérea de la planta. Aunque según la premisa anterior, no se tendría alta concentración de cadmio en esta zona, se observa la aparición de diferentes síntomas en las plantas por la toxicidad que los produce. Los principales síntomas que se observan como indica Kabata-Pendias (2011), son el poco crecimiento de la planta y daños radiculares, la clorosis producida por la deficiencia de hierro, necrosis por la inhibición de la fotosíntesis, cambios hormonales y fisiológicos (fotosíntesis, respiración celular, etc.), ocasionados de manera principal por un estrés oxidativo relacionado a la peroxidación de lípidos de las membranas celulares.

A manera de resumen, de acuerdo con Song, Jin & Wang (2016) existen tres mecanismos de absorción del cadmio por las plantas: 1) vía pasiva, es decir sin gasto de energía, lo que ocurre porque los iones hidrógeno H^+ que se encuentran en la membrana celular de las células epidérmicas de la raíz por efecto del proceso de respiración intercambian con los iones Cd^{+2} ; 2) con gasto de energía, utilizando los canales iónicos o proteínas transportadoras de Fe^{+2} , Ca^{+2} y Zn^{+2} , mediante los que el Cd^{+2} entra a las células epidérmicas de la raíz vía simplasto; 3) y como última vía de entrada, se tiene la quelatación de los iones Cd^{+2} con ácidos mugineicos que son secretados por las raíces para favorecer la disponibilidad de los iones en la rizósfera del suelo.

2.3.2. Concentración y acumulación en los diferentes órganos vegetales

Como ya se mencionó anteriormente, el Cd^{+2} entra a la raíz por cualquiera de los tres mecanismos. El porcentaje de Cd^{+2} que entra vía apoplasto a la raíz se une a diferentes ligandos de azufre que se encuentran aquí, como las fitoquelatinas (PCs) o el glutatión (GSH), así como a algunos ácidos orgánicos como el citrato, los cuales van a permitir que, por medio de la transpiración, el metal pesado pueda migrar por el xilema desde la raíz hacia los distintos órganos aéreos. Por otro lado, el porcentaje de Cd^{+2} que ingresó a la raíz vía simplasto, entra a las células por los canales de otros iones entre los que se encuentran el transportador específico de calcio LCTI y la proteína IRTI que pertenece a los transportadores de Zn y Fe (Clemens, Palmgren & Krämer, 2002). De manera que, una vez dentro de la célula, ocurre un proceso similar en el que el metal pesado se une a ligandos de azufre como el glutatión y las fitoquelatinas presentes en el citoplasma, así como a otras proteínas ricas en cisteína. De ese modo, estos complejos de Cd-ligando también pueden pasar al xilema hacia los demás órganos de la planta. No obstante, a manera de mecanismo de defensa algunas plantas regulan la concentración del metal pesado con la detoxificación por quelación de este en el interior de las células de la raíz o su acumulación en la vacuola. (Song *et al.*, 2016). La acumulación del metal en los diferentes órganos de la planta sigue la secuencia de raíces > tallos > hojas > frutos > semillas, que es una fórmula general y que teóricamente se cumple para todas las especies (Fergusson, 1990). Sin embargo, existen diferentes estudios en los que esto varía dependiendo de la especie en investigación.

En un estudio realizado por Bingham, Page, Mahler & Ganje (1975), en el que se analiza la concentración de cadmio en diferentes cultivos, se concluye la dinámica que tiene el metal al ser absorbido. Se reafirma que la acumulación del metal en las plantas varía dependiendo de la especie y el tipo de tejido vegetal de este. Por ejemplo, en los cereales y las legumbres, el metal se acumula menos en los brotes en comparación con los cultivos de hoja como la lechuga, espinaca, entre otros, en los que si hay mayor concentración en estos tejidos.

2.3.3. Efectos del Cd en la salud

Se tiene conocimiento de la toxicidad de Cd, debido a diferentes casos que han existido y se han reportado desde hace años. Uno de los más mencionados es el del gran problema en Japón, que fue el primero que generó consecuencias graves en toda una población, debido al consumo de cultivos de arroz sembrados y producidos en tierras en las que el agua de riego

estaba contaminada con el metal pesado. La enfermedad tuvo el nombre de itai-itai, la cual generó daños en los huesos, que se presentaron mediante múltiples fracturas e intensos dolores y otras alteraciones, además de problemas renales por la disfunción del riñón, mediante la que se incrementó la excreción del calcio y proteínas de bajo peso, causando finalmente osteomalacia (Smolders & Mertens, 2013).

En un estudio realizado por Beccaloni, Vanni, Beccaloni & Carere (2013), se analizó el grado de absorción de ciertos metales pesados por un grupo de cultivos y su efecto en la salud de los consumidores. Con ello, se tiene que el Cd se encontraba en mayor concentración en cultivos de hoja y, de forma general, fue uno de los metales con mayor rango de absorción por parte de los cultivos, lo mismo que lo volvería un elemento aún más riesgoso. Del mismo modo, otro resultado importante que se tuvo fue que la población con mayor susceptibilidad a la toxicidad de estos metales fue el grupo de los infantes (0 a 3 años de edad), por lo que se recomienda en el estudio controlar mejor las fuentes de alimentación que tienen.

Como aporte a este punto, de acuerdo con Järup & Åkesson (2009), se tiene el dato de que más del 80% del cadmio proveniente de los alimentos, se encuentra presente en los cereales, vegetales y tubérculos. Además, la ingesta de alimentos contaminados con Cd varía entre 8 y 25 $\mu\text{g}/\text{día}$ en promedio, valor que es mayor a los límites para evitar algún tipo de intoxicación.

2.4. Biochar

El biochar o biocarbón resulta ser carbón vegetal procesado mediante una pirolisis, que posee una estructura principalmente porosa y estable, de manera similar al carbón de origen vegetal (Guerra, 2015), es por estas características que se emplea como enmienda al suelo. Escalante *et al.* (2016) explican en su investigación un concepto más claro de biochar, en el que se menciona que es el producto de la descomposición térmica de la materia orgánica y que se obtiene por el proceso de pirólisis. Este proceso hace referencia a la quema con limitado suministro de oxígeno y a temperaturas altas (entre 300 °C a 700 °C). Los procesos por los que pasa la materia prima permiten la formación de estructuras como el grafeno y las diferentes estructuras aromáticas amorfas ordenadas, unidos ambos con enlaces de carbono en forma de anillo con oxígeno e hidrógeno.

2.4.1. Propiedades del biochar

Las propiedades del biochar dependen de diferentes factores como las condiciones de pirolisis y la materia prima para su producción, desarrollando diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas que afectan las interacciones que ocurren en el suelo y la planta. Las respuestas de la adición del biochar sobre el suelo son diversas, entre las que se tienen: incremento del rendimiento de cultivos, adsorción de metales pesados, influencia sobre el reciclaje de nutrientes y fijación de carbono atmosférico al suelo como carbono orgánico (Guerra, 2015).

Se describe al biochar como un recalcitrante, es decir, es un reservorio de carbono que no se ve afectado por la oxidación ni química, ni biológica, lo que permite que el carbono que tiene en su composición pueda mantenerse en el suelo por mucho tiempo, desarrollando un efecto positivo al medio ambiente (Escalante *et al.*, 2016).

Investigadores afirman que el producto es utilizado también para la inmovilización de metales pesados en suelos contaminados (Park, Choppala, Bolan, Chung & Chuasavathi, 2011).

Las propiedades por las que se le asigna esta característica son: el tener una estructura muy porosa, la presencia de grupos funcionales y con ello, una alta capacidad de intercambio catiónico. A continuación, se presenta un gráfico en el que se muestran los beneficios del uso del biochar, teniendo en cuenta las ventajas que genera sobre el medio ambiente principalmente.

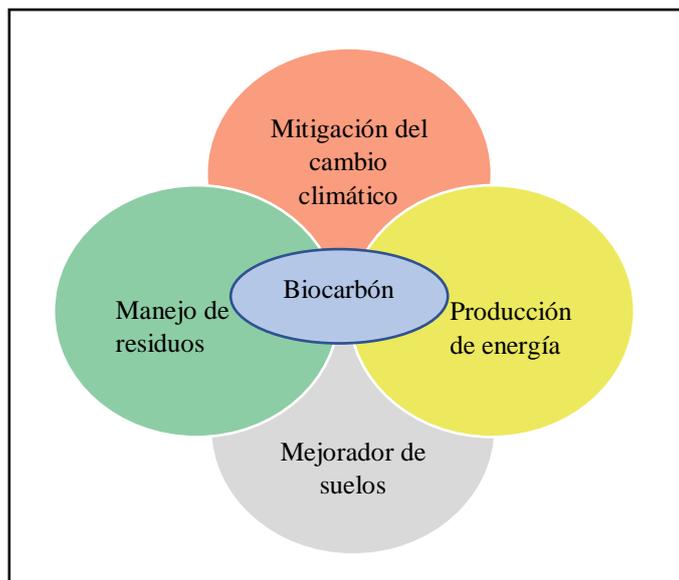


Figura 1: Beneficios del uso de biochar

FUENTE: Adaptado de Lehmann & Joseph (2009)

2.4.2. Características fisicoquímicas del biochar

Con respecto a las propiedades físicas, el biochar es un sólido carbonoso de color negro. Es amorfo y está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente de materia prima que se ha utilizado (Lehmann, 2007). Presenta una alta porosidad con micro, meso y macroporos con rangos de tamaños variados: menores a 2 nm, entre 2 a 50 nm y mayores a 50 nm respectivamente. Los macroporos dependen principalmente del tipo de materia prima, es decir su fuente de origen, mientras que los meso y microporos se originan del proceso de pirólisis (específicamente en altas temperaturas) y tienen una relación directamente proporcional con la temperatura del proceso, la misma que da origen a una carga de reacción según Gao & Masiello (2017).

Otra característica importante del biochar, es su alta área superficial específica, cuyos valores de medida pueden ser muy variables entre los diferentes tipos que existen. La biomasa de producción del biochar incide sobre esta característica, sin embargo, la temperatura de pirólisis es el parámetro que tiene influencia principalmente y de forma directa. Se tiene conocimiento de que a mayor temperatura de producción del biochar, mayor es el área superficial que posee (Lehmann, 2007).

Por otro lado, las demás propiedades del biochar se derivan de la composición química que tiene, la misma que proviene de la influencia nuevamente de la materia prima y del proceso de pirolisis que se realiza (Antal & Gronli, 2003). Se sabe que en este proceso lo que ocurre es la descomposición de las diferentes moléculas orgánicas de la materia prima del producto en mención: celulosa, hemicelulosa y lignina. De ello, se obtienen dos fracciones principales en la estructura del biochar: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas (Escalante *et al.*, 2016). De ese modo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) que posee el producto se debe a la presencia de grupos funcionales carboxílicos (C-O y C-H), que se forman sobre los puentes de estos núcleos aromáticos que provienen de la oxidación (Liang *et al.*, 2006). Estas características le dan la cualidad de poseer una elevada carga negativa, la misma que permite la adsorción de metales pesados en su superficie para lo que resulta ser muy efectivo en la remediación de suelos contaminados. Otro punto a considerar dentro de las propiedades químicas, es la porción de materia volátil que presenta el biochar en su estructura, la misma que le da la susceptibilidad a biodegradarse. Esta viene a ser el porcentaje de materia en fase gaseosa que se genera cuando el biochar es calentado y que al entrar en contacto con el suelo precipita y le provee carbono soluble. Esta muy pequeña porción de carbono puede causar deficiencia de nutrientes por antagonismo a corto plazo, ya que influye sobre el crecimiento de microorganismos que compiten con las plantas por algunos otros nutrientes en el suelo como el nitrógeno (McLaughlin & Singh, 1999). A pesar de ello, la mayor parte del carbono, que se encuentra representada en la relación C:N en la estructura del biochar, forma parte de moléculas complejas. Novak *et al.* (2009) afirman que el 58% de carbono se encuentra en estructuras aromáticas, el 29% en forma alifática y el 13% de forma carboxílica, por lo que mayormente no se altera la biodisponibilidad ni la adición del elemento en el suelo.

Por otro lado, de acuerdo con diferentes estudios de caracterización de biochar realizados por Chan & Xu (2009), se ha determinado que la variabilidad del pH no es muy amplia y que en su mayoría usualmente es alcalino. De forma concreta, el valor de pH promedio en las investigaciones es de 8.1 y con un intervalo que varía entre 6.2 y 13. Mientras que, mencionando la capacidad de intercambio catiónico, esta resulta ser muy variable y los rangos de los valores que tiene van desde las unidades más bajas hasta 40 cmol/kg. El origen de la CIC proviene producto de las características químicas de la superficie del biochar, así como su área superficial y carga negativa superficial. Aunque esta varía ligeramente en el

momento en que se aplica al suelo, por su interacción con el medio ambiente (Lehmann, 2007).

2.4.3. Condiciones de pirólisis

El proceso de pirólisis resulta ser fundamental para la adquisición de diferentes características químicas en el biochar, como ya se mencionó antes. Este proceso que se lleva a cabo a altas temperaturas y condiciones bajas de oxígeno genera un producto que posee carbono muy concentrado y material volátil. La cantidad de carbono que existe en el biochar, incluso llega a ser casi la mitad del total de carbono existente en la materia prima de origen (Guerra, 2015). En el siguiente gráfico se muestra un resumen del proceso de pirólisis y los resultantes de este mismo.

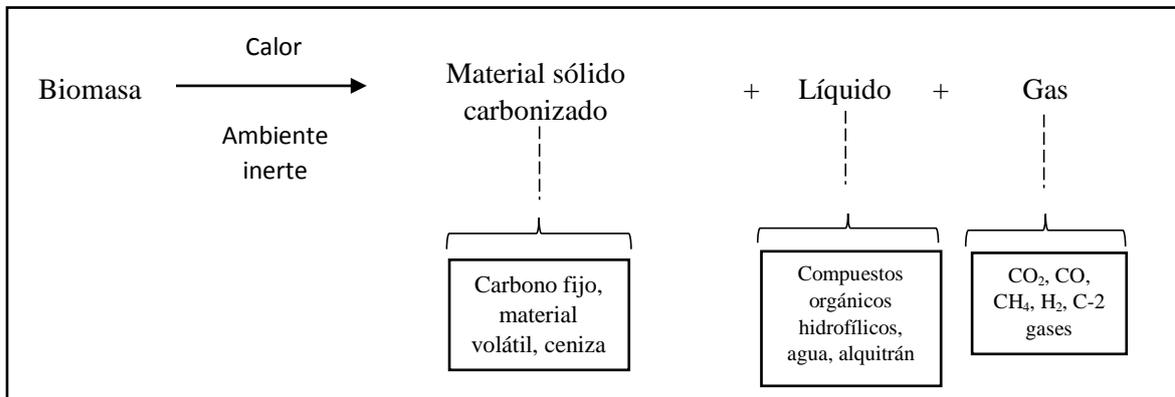


Figura 2: Representación simple del proceso de pirólisis

FUENTE: Adaptado de Brownsort (2009)

De acuerdo con Brownsort (2009), existen dos tipos de procesos de pirolisis: la pirólisis lenta y la pirólisis rápida. Ambas son importantes de diferenciar, pues cada una genera diferentes reacciones y productos resultantes de ello. La primera se relaciona principalmente con que se realiza en lapsos de calentamiento lentos y pausados, tiempos de residencia de los sólidos y gas ligeramente largos y por lo general con temperaturas menores a 400 °C, obteniendo principalmente el producto sólido (biochar) como resultado y en menor porcentaje los productos líquidos y gaseosos. Mientras que la pirólisis rápida, se distingue por realizarse con velocidades rápidas de calentamiento, tiempos de residencia muy cortos y temperaturas por encima de 500 °C; además, por el corto tiempo de residencia de vapores, el producto resultante es principalmente líquido (por ejemplo, los bioaceites).

Una investigación realizada por Gaskin, Steiner, Harris, Das & Bibens (2008) en la que se midió el efecto de las temperaturas bajas de pirólisis en relación con la agricultura, tuvo resultados importantes para analizar. Se estableció dos temperaturas para el análisis (400 °C y 500 °C) y tres tipos diferentes de biomásas. De forma general en los resultados, se obtuvo una mayor concentración de nutrientes minerales en el tratamiento con mayor temperatura. Mientras que los tratamientos con menores temperaturas resultaron con más alta capacidad de intercambio catiónico, es decir mayor carga superficial, debido al aumento en la presencia de los diferentes grupos funcionales por la descomposición de las biomoléculas estructurales de la biomasa.

Además, de acuerdo con la investigación realizada por Melo, Coscione, Abreu, Puga & Camargo (2013) en la que se evalúa la influencia de la temperatura de pirólisis en relación con la capacidad de absorción de cadmio, se tienen los resultados que muestran que a altas temperaturas se genera una reducción de los H y O como consecuencia del aumento del contenido de carbono en la estructura química del biochar y, por ende, una reducción en las relaciones H/C y O/C en proporciones molares. Todo ello, determina la relación inversa que existe entre la temperatura de pirólisis y la capacidad de intercambio catiónico del producto. Escalante *et al.* (2016) realizaron un estudio en el que se indica el proceso de pirólisis y un análisis químico en los diferentes rangos de temperatura por la descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina. El primero tiene su degradación térmica entre los 250 a 350 °C y da lugar a diferentes compuestos volátiles, quedando en el producto una red de carbono amorfa y rígida. Esto y la formación de grupos funcionales hace que la capacidad de intercambio catiónico aumente y con ello su capacidad de retención y adsorción. Por otro lado, a temperaturas mayores a 600 °C el proceso principal es la carbonización, lo que genera que se remuevan los diferentes elementos inorgánicos presentes en su estructura, como: Ca, Mg y K, por lo que el carbono llega a concentrarse en el producto (Antal & Gronli, 2003). Por ello, es importante tener en consideración el valor de la temperatura en que se lleva a cabo la pirólisis para así tener una idea relacionada de la composición del biochar.

2.5. Tipo de biomasa para la producción de biochar

La materia prima utilizada para la producción del biochar influye como uno de los principales factores que le da las propiedades al producto final. Es decir, el biochar producido va a tener diferentes características estructurales y químicas que provienen de la

descomposición del material original (componentes orgánicos de la biomasa) y de los procesos que ocurren por la pirólisis (Schmidt & Noack, 2000). Por ello, es importante entender las diferentes investigaciones del tipo de materia prima a utilizar para la producción de biochar.

Según diferentes autores, entre los materiales más utilizados en la pirólisis se encuentran los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz, residuos de aceituna y desperdicios orgánicos de la vida urbana. De este modo, se busca darle un segundo uso a este tipo de materia y así promover la reutilización de los diferentes restos vegetales que muchas veces no tienen otro tipo de uso con mayor importancia económica (Escalante *et al.*, 2016).

De acuerdo con Guerra (2015), se realizó una investigación en la que se utilizaron diferentes materias primas y se hizo la caracterización de cada biochar obtenido. Las materias primas que se utilizaron fueron: cáscara de cacao, corteza interna, externa y raquis del palmito, cáscara de sachá inchi y cascarilla de arroz. Uno de los parámetros en estudio fue el porcentaje de producción o rendimiento del biochar a partir de las diferentes biomásas. De esto se obtuvo que las dos materias primas con los mejores resultados fueron la cáscara de sachá inchi y la cascarilla de arroz. Ambas biomásas tienen en común el tener bajo contenido de humedad y un tamaño de partícula sencillo. De estos resultados se concluyó que las materias primas con estas características específicas presentaron mayores rendimientos de producción de biochar sobre los otros, debido a su resistencia a no convertirse en ceniza en el proceso de pirólisis.

En el estudio realizado por Sun, Lian, Liu, Zhu & Song (2014), se analiza la caracterización de diferentes tipos de biochar y su potencial en cuanto a la retención de cadmio. De acuerdo con los resultados de dicha investigación, se tuvo que el área superficial y volumen de porosidad del biochar producido se relacionó de forma inversa con el porcentaje de lignina de la materia prima utilizada. Es decir, se resaltó que las biomásas de madera generaron menos volumen de poros en la estructura del biochar producido, debido a su mayor cantidad de lignina y, por ende, presentaron una menor retención de cadmio. Sin embargo, es importante considerar que existen otras investigaciones como la de Lehmann (2007) en la que se indica que los parámetros de pirólisis, como el rango de temperaturas, el tiempo de

reacción y otros también influyen en cierto porcentaje sobre las propiedades físicas del biochar.

En las siguientes líneas se va a describir algunas de las características encontradas en investigaciones de los dos tipos de biochar que se utilizaron en esta investigación.

2.5.1. Biochar de cascarilla de arroz

Muchos son los factores que influyen sobre la capacidad que tiene el tipo de biochar de lograr inmovilizar metales pesados del suelo. Aun así, diversos estudios señalan al biochar de cascarilla de arroz como uno de los que tienen mejores características.

En el estudio de Lu *et al.* (2014), se realizó la caracterización del biochar de cascarilla de arroz. En esta investigación, se determinó que el pH del biochar resultante de esta materia prima presentó valores elevados y una alta alcalinidad, pero con un contenido bajo de carbono orgánico, además de una menor superficie específica a diferencia del resto. Sin embargo, la CIC del producto fue mayor que los otros teniendo un valor de 45 cmol/kg. Todo ello indica que tuvo buenas características como para poder clasificarlo como una buena enmienda en la remediación de suelos. Por otro lado, Escalante *et al.* (2016) afirmaron que las características en cuanto a composición química del biochar es muy variable y no se puede generalizar con valores específicos. Aun así, resaltó en su estudio que el biochar de cascarilla de arroz presentó una composición química favorable: 80.7 % de carbono, 9.11 % de oxígeno y 2.79 % de hidrógeno.

Vargas, Alvarado, Vega-Baudrit & Porras (2013) analizaron el contenido de lignina en el material a utilizar para la producción de biochar en el que se encontró un bajo contenido de este compuesto que refleja un valor bajo comparado con otros materiales, siendo aproximadamente de un 6.3 por ciento. El porcentaje de lignina es importante analizar en el biochar debido a que esta concentración y la temperatura de pirólisis van a ejercer una relación con la cantidad de fenoles formados en el biochar (Kaal & Calvelo, 2017). Aparte de ello, se presenta un cuadro con las diferentes características de los componentes de la cascarilla de arroz.

Tabla 2: Valores de los principales constituyentes de la cascarilla de arroz

Constituyente	Contenido
Proteína cruda, %N x 6.25	1.9 – 3.0
Grasa cruda, %	0.3 – 0.8
Fibra cruda, %	34.5 – 45.9
Carbohidratos disponibles, %	26.5 – 29.8
Cenizas crudas, %	13.2 – 21.0
Sílice, %	18.8 – 22.3
Calcio, mg/g	0.6 – 1.3
Fósforo, mg/g	0.3 – 0.7
Fibra detergente neutra, %	66 – 74
Fibra detergente ácida, %	58 – 62
Lignina, %	9 – 20
Celulosa, %	28 – 36
Pentosas, %	21 – 22
Hemicelulosas, %	12
Nutrientes digeribles totales, %	9.3 – 9.5

FUENTE: Bienvenido (1985)

2.5.2. Biochar de bambú

Lu *et al.* (2014) determinaron algunas características del biochar de bambú que son de las más resaltantes. En su investigación, se afirma que este producto se caracterizó por tener un valor alto de área superficial, así como un contenido alto de carbono orgánico. Sin embargo, a diferencia del biochar de cascarilla de arroz, la capacidad de intercambio catiónico es menor con valores aproximados de 15 cmol/kg y todas estas características se explican por las condiciones de pirolisis a las que fueron sometidas ambas materias primas.

En cuanto al porcentaje de lignina, Caballero (2010) realizó una investigación en la que se analizó diferentes especies de bambú y algunos componentes químicos de estos, sin pasar por algún proceso de calcinación. De ese modo, los análisis realizados a la materia prima permitieron determinar que el mayor porcentaje de lignina se presentó en la muestra de bambú de la especie *Guadua angustifolia* con un 23.71%. Aun así, es bueno recalcar que este valor no es necesariamente un determinante, puesto que la composición química de los individuos de las especies puede tener variaciones por otros factores no controlables.

A continuación, se presenta un resumen de algunos datos obtenidos sobre las diferentes características analizadas y ya mencionadas de ambos tipos de biochar.

Tabla 3: Propiedades fisicoquímicas de los dos tipos de biochar a investigar

Propiedad	Suelo	Biochar de bambú	Biochar de cascarilla de arroz
Arena (%)	51.5	-	-
Limo (%)	38.9	-	-
Arcilla (%)	9.6	-	-
P – met. Olsen (mg.kg ⁻¹)	18	-	-
Total P (g.kg ⁻¹)	-	2.3	2.6
Conductividad eléctrica (ds.m ⁻¹)	0.02	0.08	0.18
pH (H ₂ O)	5.7	9.5	10
Total C (g.kg ⁻¹)	8.7	860	508
Total N (g.kg ⁻¹)	2.5	4.5	16.6
Total H (g.kg ⁻¹)	-	14.9	17.2
Corg (g.kg ⁻¹)	8.7	839	470
Corg/N	-	186	28
Atomic H/Corg	-	0.21	0.44
Ash (%)	-	11.9	42.7
Capacidad de Intercambio Catiónico (cmol.kg ⁻¹)	5.3	15	45
Área superficial (BET) (m ² g ⁻¹)	-	907.4	152
Alcalinidad (cmol.kg ⁻¹)	-	123	No detectado
Cd Total (mg.kg ⁻¹)	1.4	No detectado	47
Cu Total (mg.kg ⁻¹)	693	19	4.8
Pb Total (mg.kg ⁻¹)	527	No detectado	197
Zn Total (mg.kg ⁻¹)	1471	33	

FUENTE: Lu *et al.*, 2014)

2.6. Maíz como cultivo bioindicador

El maíz posee características morfológicas radiculares que le permiten tener una buena capacidad extractiva. Además, su rápido crecimiento, su sencillo manejo agronómico y su elevada producción de biomasa le dan características aptas para poder usarse en diversas investigaciones como un cultivo indicador de la absorción de metales pesados, específicamente el cadmio (Shi *et al.*, 2015).

En adición a ello, se han realizado diversas investigaciones de los efectos causados por la toxicidad del cadmio en el cultivo de maíz. Lagriffoul, Mocquot, Mench & Vangronsveld (1998), probaron diferentes valores de concentración de Cd (0.001 a 25 µM) en una solución nutritiva en las que crecieron las plantas de maíz en estudio y se obtuvo diferentes efectos que eran influenciados por estas concentraciones. Las plantas que crecieron en soluciones con mayor concentración de cadmio mostraron efectos como menor longitud en los brotes y una disminución en la materia seca de las hojas del cultivo, así como una reducción en los

pigmentos de la clorofila, mientras que las sembradas en medios con valores más bajos de Cd presentaron principalmente cambios en las actividades enzimáticas de la planta.

Otra investigación realizada por Wang *et al.* (2007) demostró algunos efectos causados por la toxicidad de Cd en plantas de maíz (*Zea mays*). De forma general, se vio que principalmente en las dos variedades en estudio se dio la acumulación de cadmio en las raíces y una pequeña proporción pasó a los brotes, tallos y hojas. Además, se observó que a una muy alta concentración de cadmio en el estudio (10^{-4} M) se tuvo una reducción sustancial del crecimiento y desarrollo de las plantas, hojas cloróticas y con síntomas de marchitez en los bordes y puntas, así como el poco crecimiento y deterioro de las raíces. Por último, una de las dos variedades resultó ser hiperacumuladora debido a ciertas características como el producir alta cantidad de raíces, alta biomasa y su gran habilidad para acumular cadmio; lo que demostraría que incluso puede haber pequeñas diferencias morfológicas entre variedades de la misma especie.

III. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica

El presente trabajo de investigación fue conducido en el Invernadero del Laboratorio de Fertilidad de Suelos “Sven Villagarcía” de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), ubicado en el distrito de la Molina, provincia de Lima y departamento de Lima. La ubicación geográfica de la zona es la que se describe a continuación: Latitud: 12°05’06’’ sur, longitud: 76°57’07’’ oeste y altitud: 238 msnm.



Figura 3: Ubicación del Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM

FUENTE: Google Earth (2021)

3.1.2. Clima

El clima de la zona se caracteriza por tener épocas de verano húmedos, áridos y nublados, mientras que los inviernos son largos, secos y frescos. En la Tabla 4 se observa el resumen de los datos hidrometeorológicos obtenidos en la estación meteorológica “Von Humboldt” del SENAMHI, ubicada en la Universidad Nacional Agraria la Molina. Se puede apreciar

que en toda la etapa del experimento (enero del 2019 a mayo del 2019) la temperatura osciló entre 33.10 °C (febrero) como máximo y 13.30 °C (mayo) como mínimo. En todos estos meses se realizaron las dos campañas evaluadas del cultivo, teniendo como temperatura promedio los valores que van de 18.63 °C a 25.30 °C y que se encuentran dentro del rango de temperaturas que permiten un desarrollo óptimo del cultivo de maíz. En cuanto a la humedad relativa, se observa que los valores variaron llegando a tener un valor máximo de 80.74% en el mes de mayo valores que permitieron una buena transpiración, mientras que la velocidad del viento presentó un valor máximo de 3.65 m/s en el mes de febrero y en promedio 3.31 m/s durante todos los meses de investigación.

Tabla 4: Datos hidrometeorológicos de La Molina (enero a mayo del 2019)

Mes	Temperature °C			Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)
	Mínimo	Máximo	Promedio		
Enero	17.60	31.70	23.31	72.04	3.49
Febrero	19.70	33.10	25.30	68.36	3.65
Marzo	16.80	31.40	23.89	68.82	3.55
Abril	15.80	29.20	21.67	73.47	3.14
Mayo	13.30	28.20	18.63	80.74	2.72

FUENTE: Datos hidrometeorológicos a nivel nacional. Estación: Von Humboldt. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI], 2019).

3.1.3. Características del suelo

El sustrato utilizado fue extraído de manera homogénea y representativa de un área que tiene indicios de estar contaminada con altas concentraciones de cadmio (tesis en áreas aledañas, con concentraciones mayores de 1.4 ppm) y que se encuentra ubicada en la Universidad Nacional Agraria la Molina.

De acuerdo con el análisis físico-químico de la tierra empleada en el experimento, este tiene una clase textural franco arcillo arenoso, presentando 50% de arena, 24% de limo y 26% de arcilla. En cuanto al valor del pH es ligeramente alcalino (7.62), el que resulta estar dentro del rango óptimo de 6.1 a 7.8 considerado como adecuado para una buena producción del cultivo de maíz (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2019). Es un suelo ligeramente salino con una conductividad eléctrica en 1:1 de 2.61 dS.m⁻¹, siendo este un parámetro regular, ya que el maíz es un cultivo medianamente tolerante al contenido de sales

en el suelo o agua de riego (Yzarra, Trebejo, Noriega & Jacobo, 2010). El nivel de carbonato de calcio que presenta es alto (7.40%) y el porcentaje de materia orgánica de 2.12, siendo este un valor medio, pero alto si lo relacionamos con el contenido de arcilla. Los valores de fósforo y potasio disponibles en el suelo son altos, con 25.60 y 401 ppm respectivamente. La capacidad de intercambio catiónica que presenta el suelo es de 11.84 cmol.kg⁻¹, clasificada como un nivel normal y su porcentaje de saturación de bases es de 100% (Tabla 5). En referencia al contenido de cadmio en el suelo, este presenta un valor de 2.88 ppm, el mismo que sobrepasa en el doble los valores permisibles de acuerdo con lo establecido por el estándar de calidad ambiental (ECA) para el suelo (menor a 1.4 mg.kg⁻¹ PS).

Tabla 5: Características físico-químicas del suelo utilizado en el experimento

Características	Unidad	Valor	Método realizado
Clase textural		Fr.Ar.A	Método del hidrómetro
Arena	%	50	
Limo	%	24	
Arcilla	%	26	
pH (1:1)		7.62	Método del potenciómetro
C.E. (e)	dS.m ⁻¹	5.22	Método del conductímetro
CaCO ₃	%	7.40	Método gaso-volumétrico con calcímetro
M.O.	%	2.12	Método de Walkley y Black
Fósforo disponible	ppm	25.60	Método de Olsen modificado
Potasio disponible	ppm	401	Extracción con acetato de amonio
CIC	cmol.kg ⁻¹	11.84	Saturación con acetato de amonio
Ca ⁺²	cmol.kg ⁻¹	8.59	Espectrofotometría de absorción atómica
Mg ⁺²	cmol.kg ⁻¹	2.03	Espectrofotometría de absorción atómica
K ⁺	cmol.kg ⁻¹	0.83	Espectrofotometría de absorción atómica
Na ⁺	cmol.kg ⁻¹	0.39	Espectrofotometría de absorción atómica
Al ⁺³ + H ⁺	cmol.kg ⁻¹	0.00	Método de Yuan
Cd	ppm	2.88	Espectrofotometría de absorción atómica
PSB	%	100	

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes – UNALM.

Se tiene una muestra de suelo de clase textural franco arcillo arenosa, de reacción ligeramente básica, con alta presencia de carbonatos y materia orgánica si la relacionamos con el contenido de arcilla, lo que nos podría indicar problemas relacionados con la infiltración y percolación. Posee niveles altos en fósforo y potasio disponible, con baja capacidad de retención de agua y de cationes, donde predomina el calcio (72.6% de saturación), y el sodio se presenta en bajas concentraciones, pero altas en cadmio. La presencia de carbonatos y de fósforo altos, podría indicarnos problemas respecto a la

disponibilidad de micronutrientes principalmente.

3.1.4. Material vegetal

El material vegetal empleado como planta indicadora en la investigación, fue el Maíz amarillo duro (*Zea mays L.*) variedad PM-x5, obtenido del Programa de Investigación y Proyección Social en Maíz de la Universidad Nacional Agraria la Molina. El cultivo tuvo como función reflejar los resultados del efecto de la aplicación de las enmiendas en el suelo para contrarrestar la absorción del cadmio por la planta.

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales y equipos

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos que fueron proporcionados en su mayoría por el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM:

Materiales de campo

- Macetas de 4 kg.
- Tamices de 2 y 1 mm
- Mortero
- Molino eléctrico
- Jarra milimetrada
- Bolsas de plástico y ziploc
- Bolsas de papel kraft
- Sacos de rafia
- Mandil, guantes y mascarilla (al momento de usar productos químicos en campo o laboratorio).
- Pala
- Machete
- Insumos agrícolas: fertilizantes y agroquímicos
- Materiales y reactivos de laboratorio para los diferentes análisis.

Equipos e instrumentos

- Balanza

- Estufa
- Mufla
- Horno especial de pirólisis

3.2.2. Enmiendas orgánicas aplicadas

Las enmiendas que se aplicaron al suelo fueron dos tipos diferentes de biochar, cuyas características fisicoquímicas difieren por el tipo de biomasa que se utilizó en la producción de cada uno. Fueron empleadas dos tipos de biomásas para preparar el biochar, cascarilla de arroz (*Oryza sativa L.*) proveniente de la región Selva, específicamente del departamento de San Martín, mientras que la otra materia prima fueron troncos de bambú (*Guadua angustifolia*) proporcionados por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad, los mismos que tuvieron procedencia del departamento de Cajamarca. Ambas materias primas fueron procesadas en las instalaciones de la UNALM, logrando producir las dos enmiendas.

Tabla 6: Características generales de las enmiendas preparadas y en prueba

Variable	Biochar de cascarilla de arroz	Biochar de bambú
pH	8.24	10.01
C.E. (dS/m)	0.72	2.88
M.O. (%)	67.77	88.45
N (%)	0.87	0.48
P ₂ O ₅ (%)	0.38	1.11
K ₂ O (%)	0.76	3.77
CaO (%)	0.42	0.11
MgO (%)	0.21	0.23
Hd (%)	1.73	2.01
Na (%)	0.08	0.09
CIC (meq/100g)	16.4	28
Cd (ppm)	0.83	1.23

FUENTE: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes – UNALM

Las enmiendas así obtenidas presentan variaciones en su composición, por lo que se estima que sus efectos en las características de los suelos pueden variar. Siendo el preparado en base de bambú el que se caracteriza por ser alcalino, con mayor presencia de sales (C.E.) y mayor valor de CIC. Además de que posee cantidades más altas de fósforo y potasio disponible, así como de cadmio (Tabla 6). Haciendo énfasis en el pH y la C.E., ambos parámetros se encuentran relacionados con el contenido de cenizas y sales solubles que presentan las

fuentes empleadas en la preparación del biochar, es decir depende del tipo de materia prima utilizada para su producción (Novak *et al.*, 2009). En el proceso de pirolisis ocurre la combustión de los diferentes cationes, lo que genera la oxidación de estos, el aumento del contenido de cenizas y, como consecuencia el incremento del pH de la enmienda. De manera similar, la cantidad de grupos funcionales carboxilos e hidroxifenólicos que se pueden formar con la pirolisis debido a la descomposición de las moléculas orgánicas de la biomasa, es el principal parámetro que influencia sobre la capacidad de intercambio catiónico (Graber, Singh, Hanley & Lehmann, 2017). En este estudio se observa que el biochar de bambú es el que presenta mayor valor de CIC superando al biochar de cascarilla de arroz; de igual manera se observa con los valores de C.E., lo que indica una mayor presencia de solutos, tal como potasio, entre otros (Tabla 6).

La concentración de materia orgánica presentada por estas enmiendas es alta, ello puede explicarse si consideramos que el porcentaje de lignina dentro de la estructura de la biomasa vegetal usada se descompone muy difícilmente en el proceso de pirolisis, por ende en cierta forma se mantiene más estable la estructura original de la materia prima y con ello una mayor concentración de las moléculas inorgánicas en el biochar formado (Sun *et al.*, 2014), como consecuencia se podría asumir que el biochar de bambú, posee una mayor concentración de lignina.

Por último, de una manera general se puede indicar que esta enmienda en base a sus productos bases empleados, puede presentar concentraciones variables de cadmio en su composición, elemento que no se llega a perder por volatilización pues la temperatura de ebullición del cadmio se establece a 765°C y el proceso de pirolisis se realizó a 300 °C (LENNTECH, s.f.).

3.3. Metodología

3.3.1. Procedimientos

Este trabajo se realizó en condiciones de invernadero en las instalaciones del laboratorio de Fertilidad de Suelos en el que se instaló el ensayo, se hicieron las labores agronómicas y las evaluaciones necesarias para lograr los resultados obtenidos. A continuación, se muestra en detalle todos los procedimientos realizados para la instalación y manejo de la investigación.

a. Muestreo y preparación del suelo

En primer lugar, se estableció el lugar dentro de la universidad de donde se obtuvo el suelo contaminado con cadmio con el que se trabajó. Se realizó el muestreo de suelos haciendo un recorrido aleatorio considerando diez puntos en todo el campo agrícola seleccionado, de cada punto se sacó una submuestra y, juntando todas ellas, una muestra compuesta para así poder tener el suelo con el que se trabajó. Todo el suelo muestreado se llevó al laboratorio de Fertilidad de suelos, donde se extendió sobre un saco y se dejó expuesto alrededor de dos a tres días a condiciones ambientales para que pierda humedad, posterior a este tiempo, se tamizó por una malla de 2mm. Luego de ello, el mismo suelo se homogeneizó con una pala para que todo quede uniforme. De esto, se sacó una pequeña muestra de 1 kg aproximadamente para que se analice y se determine las características del suelo y sobre todo su concentración de cadmio. Por último, se separó y pesó 3.5 kg de suelo en cada maceta de capacidad de 4kg, logrando repartir todo el suelo entre 32 macetas ya preparadas (lavadas y con los agujeros de drenaje parchados).

b. Producción de biochar

Se realizó la pirolisis de las dos biomásas: cascarilla de arroz y bambú, durante toda una semana aproximadamente, considerando para ello, que los dos materiales se debían dejar secando de manera natural por dos días.

Los dos tipos de biochar utilizados en esta investigación pasaron por un proceso de pirolisis lenta a una temperatura de 300 °C, valor escogido con el fin de tener en ambos una mayor cantidad de carga negativa en su superficie, gracias a la mayor concentración de grupos funcionales que se generan a causa de este proceso realizado a una temperatura relativamente baja dentro del rango, lo que le da principalmente una mayor capacidad retentiva, como se menciona en el estudio de Gaskin *et al.* (2008).

Para realizar la pirolisis se utilizó un horno especial que trabaja a bajas condiciones de oxígeno y altas temperaturas, entre 300 a 700 °C. El primer material a pirolizar fue la cascarilla de arroz, la cual se introdujo dentro del horno de manera homogénea. Se cerró la puerta del mismo tratando de que sea lo más hermético posible y se controlaron todas las salidas de gases y alquitrán que son subproductos en la pirolisis. Luego, se especificó la temperatura del proceso en la caja de control del horno, la cual fue de 300° C y se prendió

el equipo esperando que por alrededor de tres horas termine todo el proceso, manteniendo controlado siempre las diferentes fugas de gases y buscando que la temperatura se mantenga para así obtener resultados uniformes en la pirólisis.

Debido a la alta temperatura en la que el horno culminaba de realizar el proceso, al día siguiente recién se prosiguió a sacar la muestra y almacenarla para su posterior manejo. El mismo procedimiento se realizó con el bambú, con la única diferencia de que antes de introducirlo al horno, este fue trozado con un machete para que el proceso de pirólisis sea más sencillo. Una vez obtenidos ambos materiales ya pirolizados, se pasó a moler el biochar de bambú, porque como se sabe el producto final de la pirólisis mantiene la forma original del material que se introdujo al horno, por ende, resultó más conveniente trabajar de ese modo. Luego, ambos fueron tamizados con tamices de 1 mm para que así se tengan materiales homogéneos. Una vez realizado esto, ya se tuvo los dos tipos diferentes de biochar a utilizar como enmienda. Así como en el caso del suelo, se separaron muestras de 500 g de cada uno y fueron llevadas al laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes de la UNALM para poder conocer las características físico-químicas de ambas enmiendas.

c. Aplicación de tratamientos

Una vez que ya se tenía las dos enmiendas producidas, se prosiguió a aplicarlas en las respectivas macetas en función de los tratamientos que se establecieron en el experimento. Se evaluó la aplicación de los dos tipos de biochar con cuatro dosificaciones diferentes, como se muestra en la Tabla 7. Las dosis que se muestran son consideradas para toda la campaña, y su aplicación se realizó solo una vez: antes de la siembra.

Las dosificaciones con las que se trabajó se establecieron considerando un trabajo anterior en invernadero basado en el análisis de límite de tolerancia media del biochar en el que se evaluó la respuesta del cultivo de aguaymanto manejado con diferentes dosis de biochar aplicado al suelo y en el que se estableció que como un valor máximo de dosis sería el de 30% (v/v), debido a que a valores mayores las plantas presentaron una pérdida de vigor, tamaño de hojas, altura de planta, entre otros. Por ello, se establecieron las dosis con valores que van relacionados en progresión geométrica, siendo el máximo el de 30% (v/v).

Tabla 7: Descripción de los tipos de biochar y las dosis empleadas en la investigación

Tratamiento	Tipo de biochar	Dosis de aplicación % (v/v)
B1D0		0
B1D1	Biochar de cascarilla de arroz	7.5
B1D2		15
B1D3		30
B2D0		0
B2D1	Biochar de bambú	7.5
B2D2		15
B2D3		30

FUENTE: Elaboración propia

Para poder facilitar la aplicación de los tratamientos, se calculó la relación entre el peso y volumen del biochar y se procedió a pesar las dosis equivalentes a los % de volúmenes establecidos. Una vez obtenidas y aplicadas las cuatro repeticiones por cada tratamiento, se pasó a homogeneizar las enmiendas con el suelo en cada maceta y así las 32 macetas quedaron listas para poder realizar la siembra del cultivo.

d. Siembra y manejo del cultivo

Antes de la siembra en el sustrato ya preparado, se procedió a realizar un tratamiento previo para iniciar con la imbibición de cada una de las semillas. El proceso que se realizó consistió en envolver con un papel toalla humedecido las semillas y dejarlas remojando por un periodo de veinticuatro horas. Con ello, se buscó que absorban humedad y así el agua que penetra en el interior de cada una logra llegar al embrión y activar los procesos de germinación, logrando que físicamente cada una de las semillas parezcan hinchadas.

Posterior a ello, se realizó la siembra de forma directa colocando 5 semillas en cada maceta. Luego de una semana, se realizó el desahije dejando a todas las macetas con solo tres plántulas, esto con el fin de homogeneizar todas las unidades experimentales considerando que este valor fue el mínimo que se tuvo en cuanto a plantas germinadas por maceta.

Después de una semana de realizado el desahije, se hizo la primera fertilización (14 DDS) en mg/kg con una dosis de 100 N – 200 P₂O₅ – 100 K₂O, utilizando los fertilizantes urea,

superfosfato triple y cloruro de potasio en dilución, considerando las fuentes de nitrógeno y potasio con una fertilización de forma fraccionada. Luego de un poco más de un mes (38 DDS) se realizó la segunda fertilización requerida de nitrógeno y potasio para completar hasta 200 N y 200 K₂O. Las demás labores de manejo de cultivo como el riego y el control de plagas se realizaron en el plazo de dos meses que es el periodo que permaneció instalada la primera campaña. Solo se realizó una pequeña aplicación de chlorpyrifos a una dosis de 1.5 ml/500 ml de agua, debido a que se presentó el ataque de *Spodoptera frugiperda* un poco antes de la segunda fertilización, lo que causó leves daños a algunas plantas, pero que pudo ser controlado y no afectó severamente el estudio.

e. Cosecha

Dos meses después de la siembra, se realizó la cosecha de las plantas considerando hacer la separación de la parte aérea de la parte radicular para poder hacer los análisis respectivos en cada zona.

f. Efecto residual

Se sembró por segunda vez en el mismo sustrato en cada tratamiento sin realizar alguna modificación y se repitió el experimento considerando las mismas condiciones y manejo del cultivo, todo ello con el fin de observar el efecto residual prolongado de la aplicación de las enmiendas en una segunda campaña. Pasado el mismo periodo de tiempo, se cosecharon las hojas y raíces de igual manera a la anteriormente descrita y se realizaron los mismos análisis para poder hacer las comparaciones respectivas entre ambas campañas.

3.3.2. Parámetros en evaluación

a. Determinación de materia seca

El procedimiento consistió en limpiar primero las hojas con un poco de agua para retirar el polvo, luego en cada tratamiento se cortó con una tijera de podar la parte aérea (tallos y hojas) desde la base de la planta, se cortó en trozos pequeños, se lavó y enjuagó con agua desionizada, se dejó secar por un tiempo aproximado de 4 horas siempre diferenciando cada unidad experimental, luego se guardaron en bolsas de papel kraft rotuladas con el código del tratamiento al que pertenecía y por último se llevó a estufa 70 °C en la que se dejó por 48 horas para que así pierda toda la humedad. Después de ello, se pesó cada uno de los tratamientos en la balanza digital y así se obtuvo la materia seca.

La misma metodología se utilizó con las raíces, con la diferencia que en cada tratamiento se tuvo que hacer una separación minuciosa de estas estructuras con el sustrato, evitando así tener pérdidas, por lo que luego de realizar la cosecha se procedió a dejar el sustrato de cada maceta igual a como se encontraba en un inicio, mientras que las raíces si pasaron por los procesos de trozado, lavado, secado natural y en estufa a 70 °C por 48 horas, para luego ser pesadas y con ello tener el dato de materia seca de las raíces.

b. Análisis de cadmio radicular y foliar

Para que se realizaran los análisis químicos en general primero se procesó cada uno de los tratamientos para lograr obtener una muestra de tejido vegetal seca a estufa y que se encuentre molida. Las muestras de tejido vegetal foliar y radicular de cada tratamiento por separado que se hicieron secar por 48 horas en estufa, se molieron en un molino eléctrico con tamiz de 2 mm y posterior a ello se almacenaron en bolsas herméticamente cerradas con la rotulación respectiva a cada tratamiento, repetición y separando parte aérea y radicular.

Para la determinación de cadmio foliar y radicular, se realizó una digestión seca, la misma que consistió en pesar 2.0 g de muestra de tejido vegetal, que ya se encontraba molida y seca a estufa, en un crisol previamente rotulado. Cada uno de los crisoles con muestra se colocaron en la mufla y se prosiguió a calcinarlos de la siguiente manera: 150 °C por 30 minutos, 250 °C por 1 hora y 500 °C por 3 horas. Luego de ello, se traspasó la muestra calcinada a un matraz resistente al calor y se adicionó 3 ml de ácido nítrico y perclórico bajo una campana de extracción. Se colocó en la plancha eléctrica calibrada, en la que se elevó la temperatura gradualmente hasta 175 °C y se dejó digerir por 1 hora y 30 minutos aproximadamente agitando los matraces para evitar que se quemara. La solución tomó una apariencia clara cristalina, es decir un color entre blanquecino y amarillo claro. Cuando se observó este cambio, se sacaron los matraces de la plancha y se adicionó a cada uno 10 ml de agua desionizada caliente buscando disolver lo que quedó de la digestión realizada. Una vez disuelto, se vació el contenido de cada matraz en un embudo con papel filtro y se recibió el lixiviado en una fiola de 25 ml, la cual se enrazó y por último se pasó todo el contenido a un tubo cónico de plástico de tapa enroscable para que de ese modo sea llevado al laboratorio de análisis de suelo, plantas, aguas y fertilizantes (LASPAF) en el que se realizó la lectura por medio de espectrofotometría de absorción atómica.

c. Análisis de nitrógeno foliar

Para la determinación de nitrógeno total foliar se realizó el método de micro Kjeldahl. Este método consistió en colocar 0.1 g de muestra vegetal molida más 1.0 g de una mezcla catalizadora previamente preparada (10% de sulfato de cobre + 90% de sulfato de potasio), todo ello debe estar en un balón de destilación de 100 ml de volumen. Se adicionó 3 ml de ácido sulfúrico concentrado y se colocó los balones en hornillas el tiempo necesario hasta que cambió a un color verde turquesa, para lograr esto se tenía que mover de manera constante los balones en ese lapso de tiempo. Luego de lograr el color mencionado en las muestras, se dejó enfriar cada una de ellas y se añadió entre 10 a 20 ml de agua destilada para aumentar el volumen. Se llevó las muestras a la unidad de destilación, donde se adicionó por el tubo de seguridad hidróxido de sodio (NaOH) al 50% hasta que la muestra cambió a un color oscuro, lo que indicaba la liberación de amoníaco. El amoníaco liberado se recibió en un matraz que contenía 20 ml de ácido bórico al 2%. Se dejó que continúe la destilación hasta que la solución en el matraz viró de color morado a verde claro o turquesa, momento en el que se dejaba unos 3 minutos más para detener el proceso. Terminado el proceso, se tituló el destilado con ácido sulfúrico a 0.02 N, hasta el cambio de color de verde a rojo. El gasto de ácido sulfúrico obtenido en la titulación sirvió para calcular mediante una relación el porcentaje de nitrógeno en la muestra vegetal.

3.3.3. Diseño estadístico

El diseño empleado fue el Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial de dos factores, considerando dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación de las enmiendas, haciendo un total de ocho tratamientos con cuatro repeticiones cada uno.

El modelo aditivo lineal del diseño fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ikj}$$

Donde:

Y_{ijk} = Concentración de cadmio en el maíz para el i-ésimo tipo de biochar, la j-ésima dosis de aplicación de biochar y la k-ésima repetición.

μ = Efecto de la media general.

α_i = Efecto del i-ésimo tipo de biochar.

β_j = Efecto de la j-ésima dosis de aplicación de biochar.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i-ésimo tipo de biochar con la j-ésima dosis de

aplicación de biochar.

ε_{ikj} = Efecto del error experimental.

Para $i = 1, 2; j = 1, 2, 3, 4$ y $k = 1, 2, 3, 4$

Los resultados obtenidos de los parámetros evaluados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA) para conocer el comportamiento del error experimental. Posterior a ello, se hizo comparaciones entre los tratamientos con la prueba estadística de comparación de medias de Tukey con un nivel de significación de 5% y con esto poder observar las diferencias estadísticas que pueden tener los tratamientos utilizados. El análisis de los datos de la investigación fue efectuado mediante el programa estadístico RStudio asociado a R versión 4.0.2.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación se presentan de una manera ordenada y concisa, lo que permite explicar los objetivos trazados anteriormente, haciendo un enfoque en la concentración de cadmio en la planta y las características de las enmiendas estudiadas.

4.1. Análisis de la aplicación de biochar sobre la producción de materia seca en plantas de maíz

La aplicación de una enmienda orgánica en el suelo genera una mejora en sus características y en consecuencia promueve un mayor crecimiento y desarrollo de los cultivos, siendo un indicador de esto el incremento en la producción de materia seca. Se realizaron los análisis en la parte radicular y aérea de las plantas de maíz para poder conocer la respuesta del cultivo frente a la aplicación de los tratamientos.

4.1.1. Efecto sobre la producción de materia seca en la parte radicular

Los análisis realizados muestran la respuesta positiva de la aplicación del biochar sobre la producción de materia seca en la parte radicular de las plantas. En la Figura 4, se observa el análisis de ambos factores de manera independiente, así el tratamiento con dosis 7.5% (v/v) es el que presentó una mayor cantidad de materia seca en las raíces con 7.02 g.maceta⁻¹, el mismo que resultó estadísticamente diferente a los otros tratamientos, sin incluir al testigo (sin aplicación) con 5.35 g.maceta⁻¹. Analizando este comportamiento, se muestra que el incremento de las dosis de aplicación de la enmienda tiene una relación inversa con la producción de materia seca, logrando que las dosis de biochar más altas alcancen valores bajos de materia seca radicular, incluso menos que el tratamiento testigo. Por otro lado, el análisis del tipo de enmienda refleja una mejor respuesta con el uso de cascarilla de arroz con 5.59 g.maceta⁻¹, a diferencia del biochar de bambú con 4.55 g.maceta⁻¹ (Figura 5). El análisis de varianza muestra diferencias significativas en todos los tratamientos evaluados. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe efecto significativo con el uso de los

dos tipos de enmienda a diferentes dosis sobre la producción de materia seca en la parte radicular de las plantas de maíz en la primera campaña realizada (Anexo 7). Realizando el análisis comparativo de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%, se observa la mejor respuesta con el uso del biochar de bambú utilizando la dosis de 7.5%, pues presentó 7.88 g.maceta⁻¹, seguido del tratamiento con biochar de cascarilla de arroz a la misma dosis, el cual presentó 5.88 g.maceta⁻¹. Mientras que los valores más bajos se observan con el biochar de bambú a dosis de 15% y 30% (Tabla 8, Figura 6).

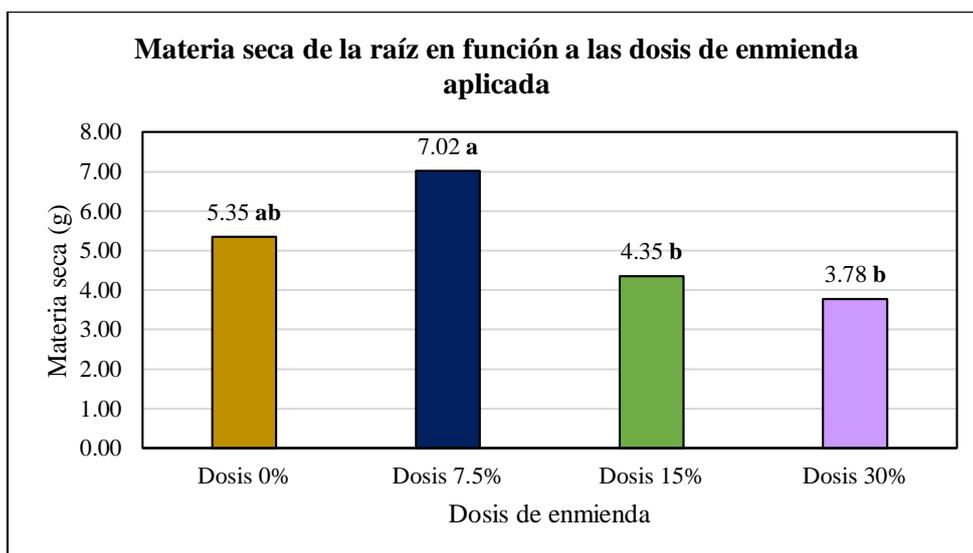


Figura 4: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la producción de materia seca de las raíces de las plantas de maíz

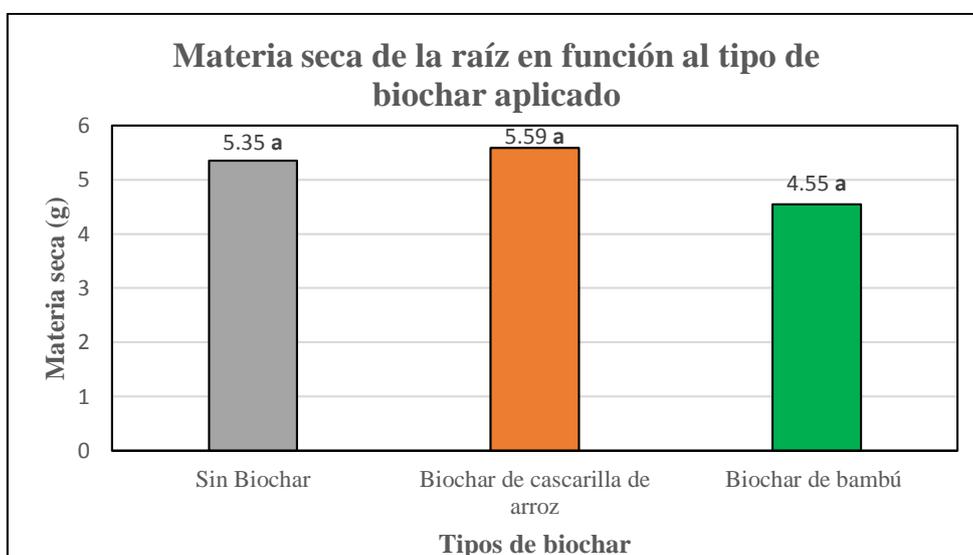


Figura 5: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la materia seca de la raíz de las plantas de maíz

Tabla 8: Efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro diferentes dosis sobre la producción de materia seca de las raíces (g de MS.maceta⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra

Dosis de aplicación %(v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (g de MS.maceta ⁻¹)	Biochar de bambú (g de MS.maceta ⁻¹)
0	5.35 b	5.35 b
7.5	5.88 ab	7.88 a
15	5.76 ab	2.94 c
30	4.45 bcd	2.82 c

CV: 21.50 %

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

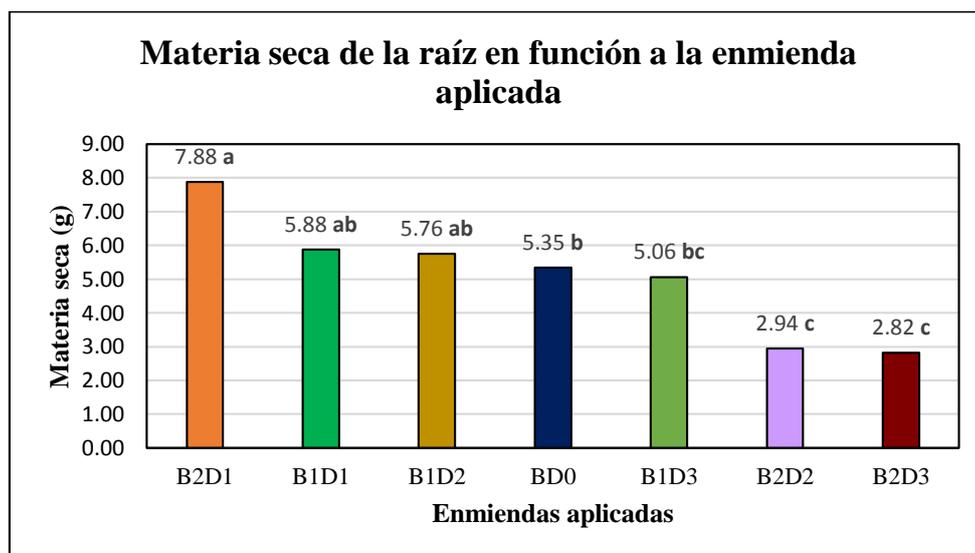


Figura 6: Efecto de los tipos de enmienda y dosis aplicadas sobre la producción de materia seca de las raíces de las plantas de maíz

Nota. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%

Se puede observar el efecto positivo de la aplicación de biochar sobre el peso seco de las raíces de maíz, tal como mencionan Zheng *et al.* (2013) en su investigación en la que tuvieron como resultado que la incorporación de biochar generó un aumento en longitud, volumen y área superficial de las raíces de maíz, a diferencia del tratamiento control. Por otro lado, la aplicación de biochar genera un aumento en la capacidad de intercambio catiónico del suelo por la elevada carga superficial que tiene la enmienda, lo mismo que genera un mayor potencial de nutrientes y con ello, una alta presencia de los macro y micronutrientes esenciales en solución, lo que permite que los procesos fisiológicos en las

plantas reflejen una mejora en el rendimiento del cultivo (Kookana, Sarmah, Van Zwieten, Krull & Singh, 2011). Del mismo modo, la adición del biochar tiene un efecto directo en la retención de agua y aireación del suelo, lo que le genera condiciones favorables para lograr un desarrollo adecuado del cultivo, empezando por un buen crecimiento de raíces.

La capacidad de intercambio catiónico que posee el biochar es elevada, lo que mejora la adsorción de los nutrientes en su superficie, siendo este proceso favorable en el crecimiento y desarrollo de la planta como mencionan Mahmoud, Ibrahim, Ali & Ali (2020), sin embargo, a dosis muy elevadas de la enmienda, la retención de los cationes en el biochar es mayor, lo que afecta a su disponibilidad pues los elementos pueden ser retenidos en mayor medida y con diferentes fuerzas y con ello se genera una menor producción de materia seca en las raíces.

4.1.2. Efecto sobre la producción de materia seca en la parte foliar

En referencia a la parte foliar, se observa el análisis de la aplicación del biochar sobre la producción de materia seca en las hojas del cultivo de maíz. La aplicación de 7.5% de enmienda permite obtener mayores valores de materia seca, pues generó 61.96 g.maceta⁻¹, seguidos de las dosis de 15% y posteriormente de 30%, las mismas que superaron al tratamiento testigo, aunque estos valores no son diferentes estadísticamente (Figura 7). Por otro lado, en relación al tipo de biochar, se presenta al biochar de bambú como la enmienda que presentó mejores resultados, pues se tuvo valores de 61.89 g.maceta⁻¹ en comparación con el biochar de cascarilla de arroz con 50.20 g.maceta⁻¹ (Figura 8, Anexo 8).

Realizando el análisis de varianza, se observa diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe al menos un tratamiento que tenga efecto positivo sobre la producción de materia seca en la parte foliar de las plantas de maíz en la primera campaña realizada (Anexo 8). En el análisis de comparación de medias de Tukey al 5% (Tabla 9, Figura 9), se muestra que la mayor cantidad de materia seca en la parte foliar del maíz se alcanzó con el uso de biochar de bambú a una dosis de 7.5 %, logrando un valor de 78.92 g.maceta⁻¹, siendo este el único que es diferente estadísticamente de los otros tratamientos, incluyendo el testigo (sin aplicación).

De manera similar al efecto en raíces, se observa una disminución en peso seco de las hojas con el aumento de las dosis de la enmienda aplicada sobre todo con los valores más altos, logrando así los menores valores con el testigo y el uso de biochar de cascarilla de arroz con 30%.

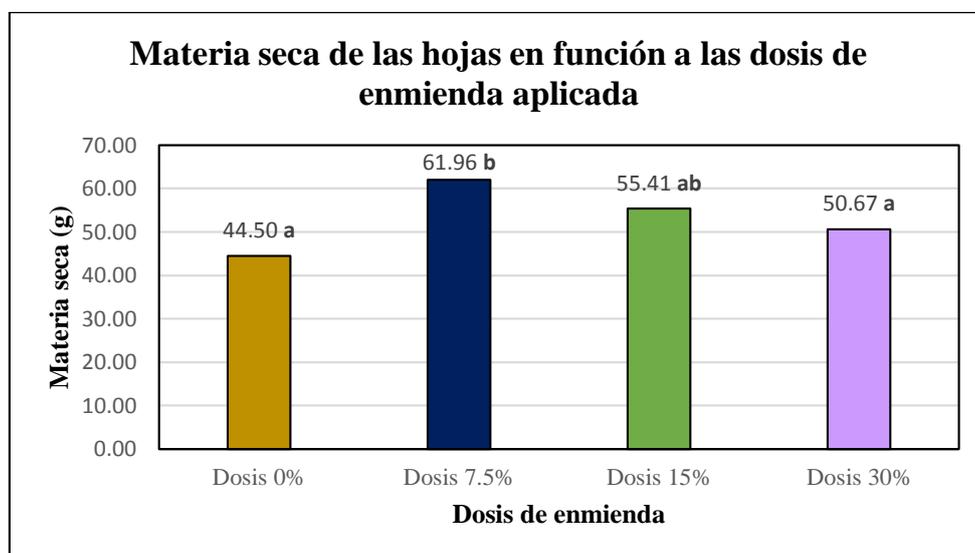


Figura 7: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz

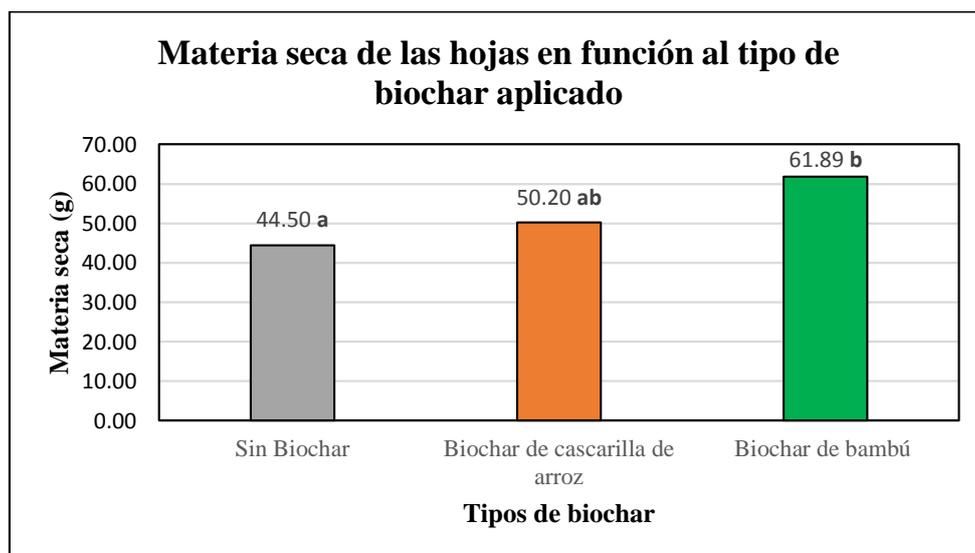


Figura 8: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz

Tabla 9: Efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro diferentes dosis sobre la producción de materia seca de las hojas (g de MS.maceta⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra

Dosis de aplicación %(v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (g de MS.maceta ⁻¹)	Biochar de bambú (g de MS.maceta ⁻¹)
0	44.50 a	44.50 a
7.5	49.24 a	78.92 b
15	58.07 a	52.74 a
30	43.62 a	53.99 a

CV: 11.07 %

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$)

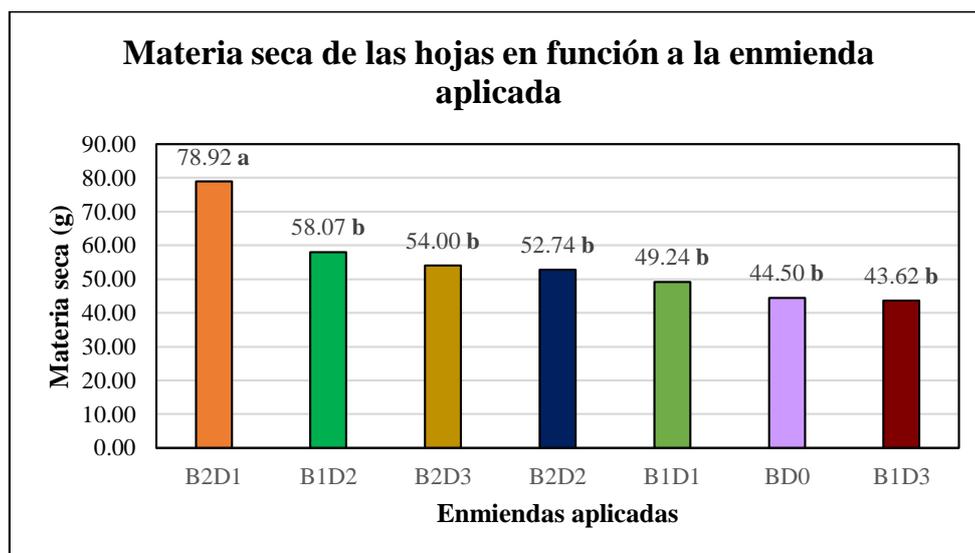


Figura 9: Efecto de los tipos de enmienda y dosis aplicadas sobre la producción de materia seca de las hojas de las plantas de maíz

Nota. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%

El uso de biochar como enmienda en el suelo ha generado efectos positivos en la producción de la materia seca foliar del cultivo de maíz, como ocurre en diversas investigaciones, como la de Manolikaki & Diamadopoulou (2019), en la que se observa que se tuvo un aumento de más del 100% del peso seco de la parte aérea de plantas de maíz con la aplicación al suelo de biochar en comparación al testigo. Así como en el caso de la respuesta de la aplicación de biochar en la parte radicular, se observa en este caso un efecto positivo sobre la parte aérea de las plantas, ya que, como mencionan Sales *et al.* (2022), la incorporación de biochar genera un aumento en la retención de agua y nutrientes en el suelo y mejora la porosidad y

permeabilidad del mismo, lo que favorece al crecimiento y por ende la producción de materia seca en los cultivos.

De manera general en ambos análisis, la aplicación de biochar proveniente del bambú permitió obtener un rendimiento significativamente superior tanto en raíces (Tabla 8) como en la parte aérea (Tabla 9) en la dosis de aplicación de 7.5% de enmienda. El biochar de bambú posee una buena característica en cuanto a la capacidad de intercambio catiónico y una mayor área superficial, lo que puede generar una mejor propiedad de retención de cationes (Zhang, Lü, Luo, Shao & He, 2014), como potencial nutricional para el crecimiento y desarrollo del maíz, pues si bien los elementos son retenidos con diferente fuerza a este nivel, aparentemente con el valor de 7.5% de la enmienda se logra un mejor equilibrio en el suelo, de modo que se logra una mayor disponibilidad de nutrientes, con el empleo de esta enmienda en las condiciones observadas.

4.1.3. Relación entre materia seca aérea y materia seca radicular sobre la dosis de aplicación de biochar

Se realizó el análisis de la relación entre la producción de materia seca en la parte aérea y la parte radicular sobre la incorporación de biochar al suelo a diferentes dosis de enmienda. La Tabla 10 muestra de manera general que existe una tendencia en la que se observa que a un aumento de las dosis de biochar aplicado la relación entre la materia seca aérea y radicular tiende a aumentar, lo que quiere decir que hubo una menor producción de raíces a mayores concentraciones de enmienda en el suelo. Utilizando ambos tipos de biochar, el comportamiento es similar, siendo los tratamientos con menor relación los de dosis 7.5% con el uso de biochar de bambú y cascarilla de arroz, así como también a una dosis de 0% del biochar de bambú, lo que se entiende que son los que presentaron una mayor producción de raíces y de hojas en el cultivo de maíz.

Tabla 10: Relación entre la producción de materia seca en la parte aérea y la parte radicular en plantas de maíz

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹ suelo)	Biochar de cascarilla de arroz (g MS.maceta ⁻¹)		Relación MS aérea/MS radicular	Biochar de bambú (g MS.maceta ⁻¹)		Relación MS aérea/MS radicular
	MS radicular	MS aérea		MS radicular	MS aérea	
0	5.35 b	44.5 b	8.32	5.35 b	44.5 b	8.32
7.5	5.88 ab	49.24 b	8.37	7.88 a	78.92 a	10.01
15	5.76 ab	58.07 b	10.08	2.94 c	52.74 b	17.93
30	5.06 bc	43.62 b	8.62	2.82 c	54.00 b	19.15

Nota. Relación entre la producción de materia seca foliar y radicular sobre la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en las plantas de maíz.

Muchos investigadores afirman que existe una relación positiva y directa entre la producción radicular y la producción de la biomasa aérea en los cultivos, es decir que, si incrementa uno de estos parámetros, ocurre lo mismo con el otro, como se puede observar en la Tabla 10, específicamente con el uso de biochar de bambú, siendo este el mejor tratamiento observado a una dosis de 7.5%.

Sun *et al.* (2017) demostraron que la aplicación de biochar a una dosis elevada (mayor de 30%) inhibió el crecimiento y desarrollo de las raíces laterales del cultivo de maíz, mientras que con una dosis de 5% hubo una influencia aun positiva, logrando una mayor producción de raíces. La aplicación de biochar como enmienda genera buenos resultados sobre la producción de materia seca por el aumento de la biomasa de las diferentes estructuras vegetales del cultivo, sin embargo, se observa un efecto contrario cuando la dosis de enmienda llega a ser muy alta, pues se reduce la cantidad de biomasa producida, sobre todo en la parte radicular. Por lo que se afirma que el uso de diferentes dosis de biochar influyó de manera directa en la formación del sistema radicular, siendo por lo general las dosis más bajas las que generaron mejores resultados.

Algunas razones por las que se explica este comportamiento, se relacionan con algunas propiedades físicas y químicas del suelo, principalmente con el incremento de la capacidad de retención de agua por la adición de altas dosis de biochar, lo que puede reducir la aireación en el suelo y ello generar una disminución del crecimiento radicular. Además, una dosis alta

de enmienda puede generar un cambio mayor en el pH del suelo por la misma característica del biochar de ser alcalino y esta condición reduce el crecimiento y producción de raíces en el suelo (Xu *et al.*, 2013). Otra posible explicación se puede relacionar a la presencia de sustancias químicas como metales pesados o algunos compuestos volátiles en la enmienda, lo que pueden causar la muerte de células en las raíces a altas dosis de aplicación de la misma, pero esto es algo que aún tiene que seguir investigándose, por el efecto mínimo que se ha observado en otras investigaciones como la de Li *et al.* (2015).

4.2. Efecto de la aplicación de biochar sobre la concentración de cadmio (Cd) en plantas de maíz

El suelo es la principal fuente de elementos absorbidos por las plantas vía sistema radicular. Si consideramos que el suelo en estudio presenta una alta concentración de cadmio (Tabla 5), entonces las plantas de maíz sembradas en esta tierra tenían una alta posibilidad de absorber y concentrar cadmio en sus estructuras. Como ya se ha mencionado anteriormente, el biochar es una enmienda que proviene de la pirolisis de diferentes restos vegetales y que posee muy buenas características relacionadas principalmente con su capacidad de retención (almacenamiento de elementos), la misma que podría servir en un programa de remediación de suelos contaminados con cadmio, pues retendría este elemento pesado sustrayéndolo de la solución. Este efecto lo podemos observar en el resultado del presente trabajo, pues con la aplicación de biochar disminuye la presencia de cadmio en las raíces principalmente, los valores alcanzaron diferencias estadísticamente significativas en la prueba de Tukey al 5% (Tabla 11).

4.2.1. Efecto sobre la concentración de cadmio en la parte radicular del maíz

El análisis de varianza de la concentración de cadmio en la parte radicular muestra diferencias significativas en todas las fuentes de variación: tipo de biochar y dosis de aplicación, así como en la interacción de ambos factores. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación de esta enmienda sobre la absorción de cadmio en la parte radicular de las plantas de maíz en la primera campaña realizada (Tabla 11, Anexo 9).

Realizando el análisis de la aplicación del biochar como enmienda, en la Figura 10 se observa que el tratamiento con dosis 0% (testigo – sin aplicación) fue el que presentó mayor concentración de cadmio en las raíces con 1.23 mg de Cd.kg⁻¹ de raíz, a diferencia de los otros tratamientos en los que si se aplicó biochar. Además, según la prueba de Tukey al 5%, se demuestra que el efecto de la aplicación del biochar a diferentes dosis (%v) tiene respuestas positivas y con una relación inversa entre el incremento de las dosis de enmienda y la absorción de cadmio en la parte radicular de las plantas.

En referencia a la prueba de efectos simples, con el uso del biochar de cascarilla de arroz y las diferentes dosis aplicadas, existe diferencia significativa entre el tratamiento testigo y las demás dosis. Además, la mejor respuesta fue la que se tuvo con una dosis de 30%, pues registró la menor concentración de cadmio con un 0.66 mg Cd. kg⁻¹ de raíz. Sin embargo, comparando el efecto solo entre las dosis a 7.5%, 15% y 30%, se puede observar que no hay diferencia significativa entre ellos. Por otro lado, respecto al biochar de bambú, este presentó los mejores resultados en cuanto a esta parte de la investigación (Figura 11, Tabla 11). Las dosis donde se registraron mejores respuestas fueron las de 15% y 30%, en ambas se observaron las menores concentraciones de Cd en las raíces con promedios de 0.31 y 0.35 mg Cd.kg⁻¹ de raíz respectivamente, mostrando ambas diferencias significativas de las otras dos: el tratamiento testigo y la dosis a 7.5%.

Tabla 11: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio radicular (mg Cd.kg⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹ suelo)	Biochar de cascarilla de arroz (mg Cd.kg ⁻¹)	Biochar de bambú (mg Cd.kg ⁻¹)
0	1.50 a	1.04 ab
7.5	0.72 bc	0.97 ab
15	0.78 bc	0.31 c
30	0.66 bc	0.35 c
CV: 31.08 %		

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

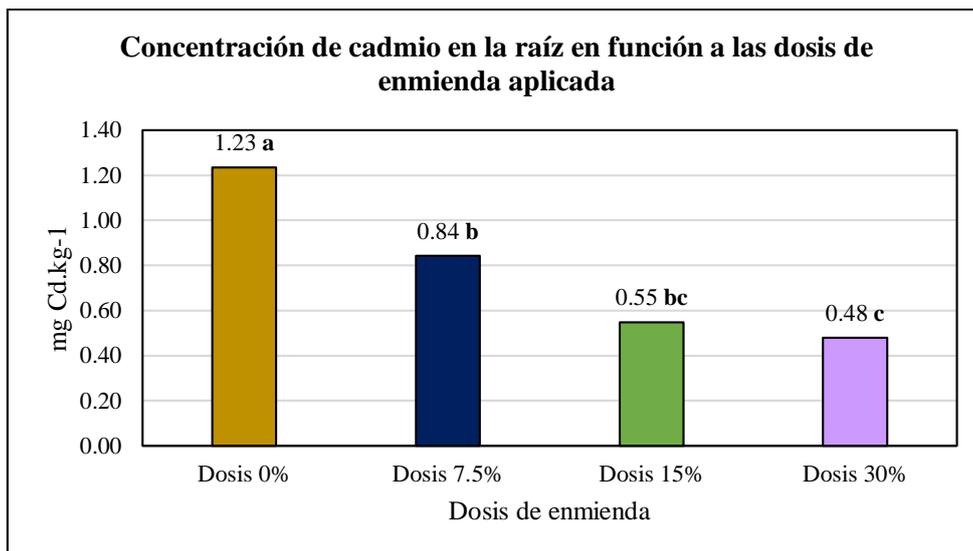


Figura 10: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz

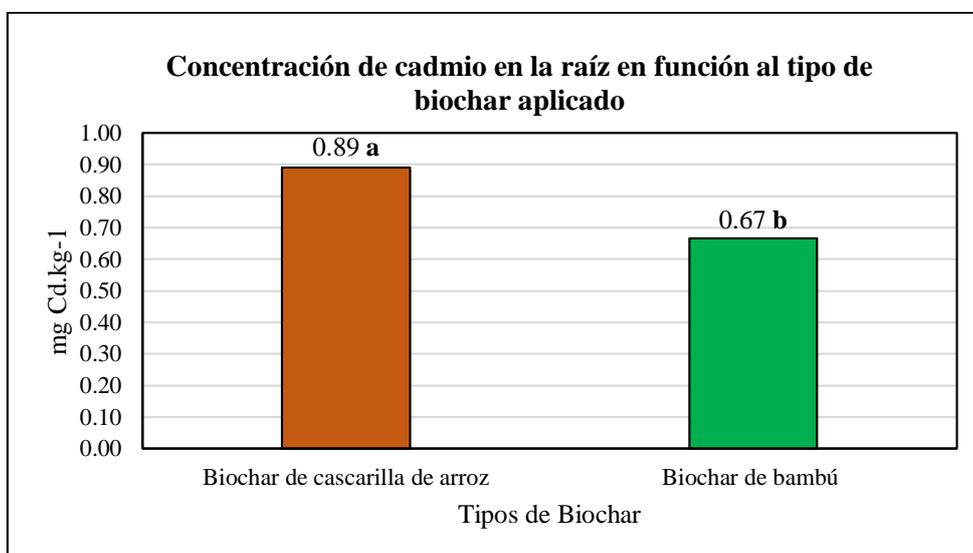


Figura 11: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz

El biochar se caracteriza por ser un compuesto orgánico coloidal, lo que quiere decir que por diferencia de cargas retiene a los cationes en su superficie. Su empleo como enmienda en el suelo puede reducir la disponibilidad de un elemento para la planta, como es el caso del cadmio. Los cationes son retenidos con diferente fuerza, dependiendo de la valencia y del grado de hidratación, así como también puede ser influenciado por el tipo de coloide y su posición en la doble capa difusa.

Antal & Gronli (2003) mencionan la influencia de la pirólisis y materia prima del biochar sobre sus características y propiedades. Con el fin de comparar el efecto del uso de dos materias primas, se realizó el análisis de los dos tipos de biochar provenientes de cascarilla de arroz y bambú, y así establecer aquel que resulta más efectivo frente a reducción de la absorción de cadmio en el cultivo en estudio.

Según lo que se indica en muchas investigaciones, el pH es el parámetro que más influencia tiene sobre el comportamiento del cadmio en el suelo, sin embargo, es importante analizar otros parámetros como la conductividad eléctrica, relación con otros iones, entre otros. Observando el análisis de los dos tipos de biochar utilizados (Tabla 6) podemos destacar que la conductividad eléctrica del biochar de bambú resulta más alta, lo que podría influenciar en la solubilidad del cadmio y con ello una mayor asimilación, puesto que un mayor valor de conductividad eléctrica indica una mayor concentración de sales solubles, entre ellas del ion cloruro y sulfato, estos reaccionan con el cadmio formando compuestos muy solubles que podrían aumentar la asimilación del metal. Aun así, esto genera solo un efecto sobre los cationes de cadmio que se encuentran en solución, por lo mismo que el efecto de la conductividad eléctrica es pequeño en comparación con la capacidad del biochar de adsorber el cadmio en su superficie.

En la Tabla 6, se muestra cierto porcentaje de calcio dentro de ambas enmiendas utilizadas, que nos indicaría que puede existir antagonismo de este elemento sobre el cadmio. Lo que mencionan Ma & Matsunaka (2013) en el estudio realizado utilizando biochar como una fuente de fósforo y enmienda para suelos ácidos, es que el calcio y magnesio intercambiables presentes en el biochar pueden llegar a pasar a la solución suelo y estar disponibles para la planta, ya que ellos encontraron mayor concentración de calcio y magnesio en el suelo de los tratamientos con elevadas dosis de biochar a diferencia del tratamiento en el que no se aplicó enmienda. Pese a este posible aumento de calcio en solución derivado del biochar, la influencia que estaría generando por competencia con el cadmio sería muy baja en esta investigación, ya que se observa una mayor absorción de cadmio en las plantas tratadas con el biochar de cascarilla de arroz, a pesar de que este tiene mayor porcentaje de calcio en su estructura según el análisis realizado (Tabla 6).

Se logra ver también que ambas enmiendas poseen cadmio en su estructura a un valor medio a alto, siendo el biochar de bambú el que posee un mayor valor. Las enmiendas orgánicas también pueden tener metales pesados, principalmente derivados de la materia prima con la que se producen. El cadmio presente en ambos biochar podría estar generando una mínima influencia en el aumento de cadmio en solución, pero que esta no resulta significativa o es contrarrestada por las otras características del biochar, ya que el efecto comparado entre ambos es diferente al esperado, menor absorción de cadmio en el biochar de bambú pese a que este tiene mayor concentración del catión en su estructura.

De acuerdo con la Figura 10, se observa un comportamiento efectivo en el que mientras se aumenta la dosis de biochar aplicado, la absorción de cadmio por las plantas disminuye y esto ocurre porque lógicamente una mayor dosis genera una mayor cantidad de área superficial, pero sobre todo mayores cargas negativas (CIC), lo que permite un aumento en la retención de Cd por el biochar. Una dinámica similar se puede observar en la investigación de Abbas *et al.* (2017) en la que se utilizaron cuatro dosis de aplicación de biochar para evaluar el efecto de la absorción de cadmio por el cultivo de trigo y se observó que a mayor dosis de biochar aplicado se tuvo menor concentración de cadmio en las diferentes partes del cultivo.

Realizando una comparación entre la aplicación del biochar de cascarilla de arroz y el biochar de bambú se observan mejores resultados en este último, es decir menores concentraciones de Cd en las raíces (Figura 11). La razón principal para poder sustentar este comportamiento es la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del biochar de bambú, pues según el análisis de esta enmienda, esta es la que presentó mayor valor de CIC, siendo este de $28 \text{ meq.}100\text{g}^{-1}$, mientras que en el caso del biochar de cascarilla de arroz se presentó una CIC de $16.4 \text{ meq.}100\text{g}^{-1}$. Liang *et al.* (2006) determinaron que la capacidad de intercambio catiónico del biochar tiene influencia principalmente en el tipo de materia prima utilizada en la producción de la enmienda. Las moléculas orgánicas de las fuentes utilizadas pasan por procesos de oxidación que genera la aparición de grupos funcionales C-O y C-H, y con ello la carga superficial del biochar que permite la adsorción de los diferentes metales pesados mediante una unión química entre especies adsorbentes y adsorbidas.

Otra característica importante a considerar, es la del pH de la enmienda, que puede ejercer cierto grado de influencia sobre la disponibilidad del cadmio en el suelo. Naidu *et. al* (1994) mencionan que cuando este valor es más alto, el cadmio puede formar complejos con otras moléculas del suelo llegando estas a precipitar, y así un gran porcentaje del metal pesado no estaría disponible para ser absorbido por las plantas. La menor concentración de cadmio obtenido por el tratamiento con biochar de bambú (Figura 11), puede generarse por la influencia de su pH que es el que reportó mayores valores de este parámetro en referencia al biochar de cascarilla de arroz.

El porcentaje de materia orgánica (MO) que poseen las enmiendas depende principalmente de la composición estructural de la materia prima y este valor tiene importancia puesto que influye directamente en su carga superficial, ya que está determinado por los elementos resultantes de la combustión de las moléculas orgánicas (grupos funcionales principalmente) (Balta, 2019). El biochar de bambú presentó un mayor porcentaje de MO a diferencia del biochar de cascarilla de arroz, siendo de 88.45% y 67.77% respectivamente. Ambos valores coinciden con el comportamiento de la CIC en ambas enmiendas y con ello en la adsorción de ciertos cationes. Por último, el biochar de bambú posee un mayor porcentaje de lignina en comparación con el biochar de cascarilla de arroz, por ser un producto maderable. Sun *et al.* (2014) resaltaron la relación inversa entre este parámetro y las características superficiales del biochar (volumen de porosidad y área superficial). Según lo afirmado, el biochar de cascarilla de arroz tiene una mayor área superficial y porosidad, características que en este caso resaltarían de esta enmienda e influyen, en cierto modo, en su capacidad de retención. Aun así, se podría indicar que la CIC de la enmienda usada tiene aún mayor relevancia sobre las propiedades de adsorción del biochar por lo que se ve una mejor respuesta con el biochar de bambú.

Luego de ser absorbido por las raíces de las plantas en un suelo con alta concentración de cadmio, este metal pesado se transloca a la parte aérea llegando a los diferentes órganos vegetales, siguiendo distintos mecanismos metabólicos tal como lo mencionan Clemens *et al.* (2002). Muchos de estos órganos resultan ser los productos cosechables, lo que hace que sea una de las razones principales por las que el cadmio es considerado nocivo para el ser humano. Por ello, resulta importante también conocer cuál es el efecto de la aplicación de biochar sobre la absorción y traslocación del cadmio hacia la parte aérea (hojas) del cultivo.

4.2.2. Efecto sobre la concentración de cadmio en la parte foliar del maíz

El análisis de varianza de la concentración de cadmio en la parte foliar muestra diferencias significativas en solo una fuente de variación: el tipo de biochar. Mientras que el factor dosis y el factor interacción biochar:dosis resultaron no significativos. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha= 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe efecto diferencial en el tipo de biochar aplicado sobre la concentración de cadmio en la parte foliar de las plantas de maíz en la primera campaña realizada (Tabla 12, Anexo 10).

Como ya se mencionó, realizando el análisis del factor dosis de aplicación no se observan diferencias significativas entre los tratamientos. Según la prueba de Tukey al 5%, se puede observar que los valores de las cuatro dosis en evaluación, incluyendo a la dosis 0% (testigo – sin aplicación), no son estadísticamente diferentes, lo que indica que la aplicación de biochar no generó un efecto significativo sobre la concentración de cadmio en las hojas del maíz (Figura 12). Por otro lado, el efecto del factor tipo de biochar muestra una mejor respuesta del biochar de bambú, pues las plantas tratadas con esta enmienda presentaron valores promedio ligeramente menores de concentración de cadmio en las hojas (0.36 mg Cd.kg⁻¹ de hojas) a diferencia de las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz (0.41 mg Cd.kg⁻¹ de hojas) (Figura 13). De forma complementaria a la investigación, se realizó el análisis de efectos principales debido a que no se encontró interacción entre los factores tipo de biochar y dosis en la parte foliar. Los resultados obtenidos muestran que al utilizar la dosis de 15%, se observan diferencias entre el uso de biochar de cascarilla de arroz y biochar de bambú por lo que se podría concluir esta dosis como la más efectiva (Anexo 10.b).

Tabla 12: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio foliar (mg Cd.kg⁻¹) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (mg Cd.kg ⁻¹)	Biochar de bambú (mg Cd.kg ⁻¹)
0	0.39 ab	0.31 b
7.5	0.37 ab	0.39 ab
15	0.45 a	0.34 ab
30	0.42 ab	0.37 ab
CV: 14.02 %		

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

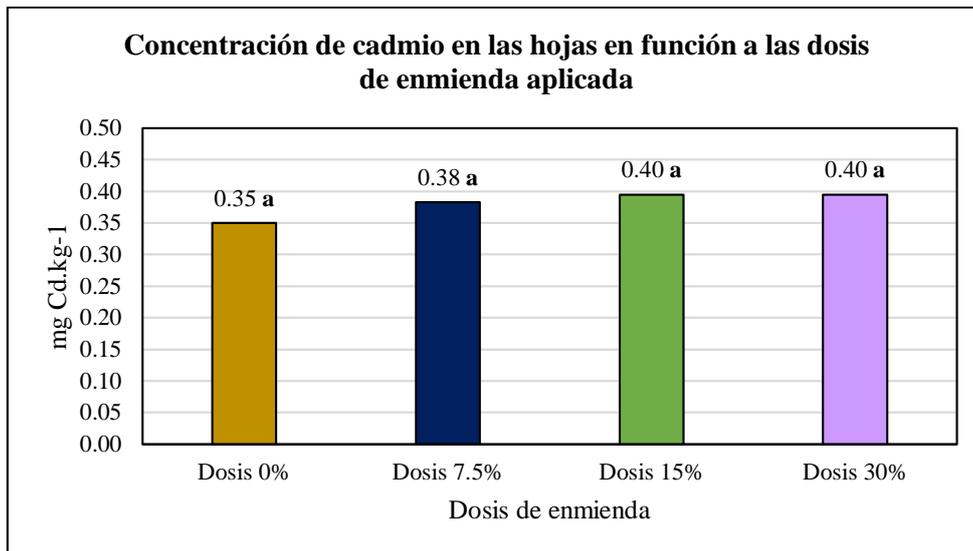


Figura 12: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz

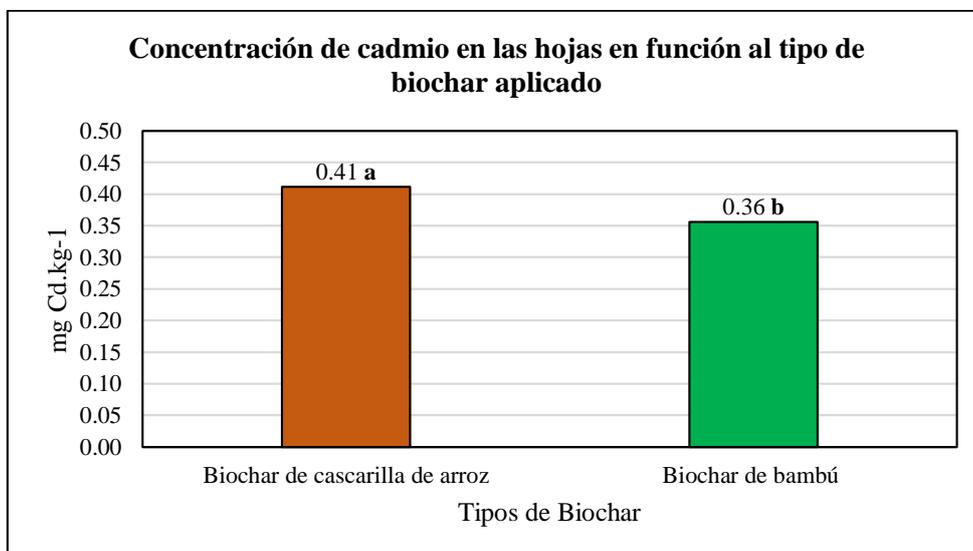


Figura 13: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz

Analizando la Figura 12, en primer lugar, se puede observar que las concentraciones de cadmio en la parte aérea, considerando todas las dosis de aplicación de biochar, son menores que los valores encontrados en la parte radicular, debido a que en el sistema radicular el elemento queda almacenado a nivel de las vacuolas, reduciendo su translocación a las partes aéreas de la planta (Chan & Hale, 2004).

Por otro lado, no existe diferencias significativas entre los tratamientos en el análisis de efectos simples con la prueba de Tukey al 5% (Tabla 12). Resultados similares se observaron en la investigación de Balta (2019), que utilizó biochar y carbón activado para observar su efecto sobre la concentración de cadmio en las plantas de tomate. Se describió un comportamiento similar en el que la aplicación de biochar no generó ningún efecto diferenciado en la parte foliar. Muchas veces la raíz evita la entrada y posterior traslocación de los metales pesados hacia los demás órganos de la planta, con el fin de proteger los tejidos vegetales de ser afectados por una posible toxicidad a causa de estos elementos.

Del mismo modo, Puga, Abreu, Melo & Beesley (2015) investigaron el efecto de la aplicación de biochar en suelos contaminados con metales pesados, en el que resaltan su efecto positivo sobre la reducción de la disponibilidad de los metales en el suelo y agua del suelo. A pesar de ello, también se tuvo el efecto negativo en algunos tratamientos en los que las plantas presentaron una mayor traslocación de la raíz hacia las hojas y brotes, por lo que se mostraron altas concentraciones de los metales pesados en los órganos vegetales aéreos, siendo incluso el cadmio el más translocado.

La composición estructural de la materia prima condiciona principalmente las características químicas y también físicas del biochar (Verheijen, Jeffery, Bastos, Van der Velde & Diafas, 2010). El biochar de bambú posee un mayor rendimiento en la producción de la enmienda luego del proceso de pirólisis, esto por la baja degradación térmica de la lignina. Además, presenta un bajo contenido de ceniza lo que influye en su baja composición mineral, por ende, posee una mayor concentración de elementos orgánicos (carbono, oxígeno e hidrógeno principalmente), lo que a su vez genera una mayor capacidad de carga negativa. Estas características son las que también podrían estar intercediendo en la mejor respuesta de esta enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz evaluadas (Figura 13).

Resultados similares fueron presentados por Liu *et al.* (2018), quienes realizaron una investigación utilizando biochar de bambú y biochar de cascarilla de arroz como enmienda para estudiar su efecto frente a la disponibilidad de cadmio en el suelo y su acumulación en *Brassica chinensis*. En dicha investigación, se tuvo una reducción significativa de la concentración de Cd acumulado en los tejidos de las plantas tratadas con biochar de bambú,

debido a las características favorables que presentó esta enmienda.

4.2.3. Relación entre la concentración de cadmio aéreo y cadmio radicular sobre la dosis de aplicación de biochar

El cadmio absorbido por las plantas presenta un comportamiento similar en cuanto a la acumulación de los metales pesados en sus órganos vegetales. Tal como menciona Fergusson, (1990), la concentración va de forma descendente de los tejidos inferiores hacia los superiores. En esta investigación se reafirma este comportamiento en el que las raíces presentaron mayor concentración de cadmio que las hojas en todos los tratamientos establecidos, debido a su retención en las vacuolas. Sin embargo, observando las relaciones entre la parte aérea con la concentración de cadmio en la parte radicular se puede apreciar un efecto negativo en relación con la translocación del cadmio (Tabla 13).

Los resultados obtenidos en el análisis entre la concentración de cadmio en la parte foliar y radicular y la relación que existe entre ellos muestran un comportamiento similar en ambos casos, lo que se relaciona directamente con la translocación del cadmio en estos órganos vegetales. Con ambas enmiendas se observa que esta relación aumenta conforme aumentan las dosificaciones del biochar aplicado en el suelo, mostrando una correlación alta positiva con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.714 y 0.763 para el bambú y la cascarilla de arroz respectivamente (Anexo 11). Esta respuesta es diferente a la esperada, pues lo que indica es un aumento en la concentración de cadmio foliar cuando se aumenta una mayor dosis de biochar, pese a que el cadmio radicular si disminuye, es decir un efecto negativo de la translocación del cadmio de las raíces a las hojas.

La aplicación de los dos tipos de biochar resulta favorable para la retención de cadmio en la enmienda y así disminuir su disponibilidad en el suelo, además de mejorar algunas características en el cultivo, sin embargo, estos últimos resultados reafirman que a dosis elevadas (mayores a 7.5% v/v) de biochar el efecto de su aplicación puede traer respuestas negativas sobre la translocación del metal pesado hacia los órganos aéreos.

Tabla 13: Relación entre las concentraciones de cadmio en la parte aérea y la parte radicular en plantas de maíz

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹ suelo)	Biochar de cascarilla de arroz (mg Cd.kg ⁻¹)		Relación Cd aéreo/Cd radicular	Biochar de bambú (mg Cd.kg ⁻¹)		Relación Cd aéreo/Cd radicular
	Cd radicular	Cd aéreo		Cd radicular	Cd aéreo	
0	1.50 a	0.39 ab	0.26	1.04 ab	0.31 b	0.3
7.5	0.72 bc	0.37 ab	0.51	0.97 ab	0.39 ab	0.4
15	0.78 bc	0.45 a	0.58	0.31 c	0.34 ab	1.1
30	0.66 bc	0.42 ab	0.64	0.35 c	0.37 ab	1.06

Nota. Relación entre las concentraciones de cadmio foliar y radicular sobre la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en las plantas de maíz.

Se define factor de translocación a la relación de los metales pesados en la parte aérea de las plantas respecto a la misma variable cuantificada en la parte radicular. Si el valor de esta relación es mayor a 1, indica que existe una gran capacidad de transportar metales pesados desde las raíces hacia las hojas; por otro lado, si el valor es menor a 1, la translocación es mínima (Orroño, 2011). En la Tabla 13, se observa que los valores del factor de translocación son en su mayoría menores a 1, sin embargo, se muestra la tendencia al aumento con el incremento de las dosis de la enmienda, lo que reafirma una mayor facilidad de translocación del cadmio a mayores dosis de biochar aplicado.

Tal como mencionan Ahmad, Akthar, Zahir & Mitter (2014), en el estudio que realizaron en el que evaluaron la aplicación de dos enmiendas orgánicas (compost y lodo de biogás) sobre la dinámica del cadmio en maíz y trigo. Se observó que con el uso del compost se redujo la absorción de cadmio en ambos cultivos y a su vez aumento la materia seca, sin embargo, la translocación del metal pesado aumentó, este último comportamiento ocurrió especialmente en el maíz.

Del mismo modo, Xu *et al.* (2016) estudiaron el efecto de la aplicación de biochar de tres diferentes materias primas (bambú, arroz y trigo), sobre la concentración y acumulación de cadmio en las plantas de maíz y raygrass. Se pudo observar un efecto positivo en la parte aérea con el uso de las enmiendas, pues estas redujeron la concentración y acumulación de cadmio en los brotes del tratamiento de maíz. Sin embargo, en la parte radicular no se vio efecto significativo frente a su aplicación, lo que refuerza la idea de que la razón por la que

haya este tipo de diferencias entre la concentración de cadmio en la parte radicular y la parte aérea sea por la presencia de alguna barrera fisiológica entre la interfaz de las raíces y las hojas de las plantas. Por otro lado, se observa que con el uso del biochar de cascarilla de arroz, el factor de translocación resulta menor al obtenido con el uso del biochar de bambú en casi todas las dosis de aplicación de la enmienda. Wang, Zhang, Lu, Xiao & Chen (2020) probaron el efecto de la aplicación de biochar con alto y bajo contenido de silicio sobre la absorción, translocación y acumulación de cadmio en plantas de arroz, demostrando que el contenido de silicio en la enmienda o el suelo genera un rol vital y positivo, evitando la translocación de cadmio en los cultivos, de manera similar a como ocurre en esta investigación.

4.3. Efecto residual del biochar en la reducción del cadmio en plantas de maíz

Una de las características importantes de toda enmienda orgánica es el efecto residual que esta puede tener, es decir la dinámica de sus propiedades en el tiempo con respecto a las funciones que cumple. Es importante conocer el comportamiento de la capacidad de retención que tiene el biochar a mediano y largo plazo, la cual está relacionada con la carga negativa en su superficie de adsorción, para poder evaluar su comportamiento en el tiempo y su efecto sobre la concentración y acumulación de cadmio en los tejidos de las plantas. Con el fin de evaluar esta característica se ha realizado el análisis de los dos diferentes tipos de biochar y las cuatro dosis de aplicación de estas enmiendas sobre la extracción de cadmio en la parte radicular y aérea de las plantas de maíz en una segunda campaña de siembra.

4.3.1. Concentración de cadmio (Cd) en la raíz en la segunda campaña de siembra

El análisis de varianza de la concentración de cadmio en la parte radicular en la segunda campaña de siembra muestra diferencias significativas en el factor dosis y la interacción entre tipo de biochar y dosis de aplicación. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación de esta enmienda sobre la absorción de cadmio en la parte radicular de las plantas de maíz en la segunda campaña de siembra (Tabla 14, Anexo 12).

En la Tabla 14, se observa que los menores valores de la concentración de Cd en las raíces de las plantas fue con la dosis 0% y 15% para el biochar de cascarilla de arroz presentando

0.52 y 0.74 mg Cd.kg⁻¹ de raíz respectivamente, y la dosis 0% y 7.5% para el biochar de bambú, con 0.66 y 0.75 mg Cd.kg⁻¹ de raíz respectivamente. Por otro lado, en las plantas tratadas con el biochar de cascarilla de arroz solo se encontró que la dosis 30% es la mayor y la única que tiene diferencia significativa frente a la dosis 0% (testigo), mientras que en el caso del biochar de bambú, la dosis 15% fue la única que también presenta diferencias significativas con el testigo.

Analizando el factor dosis, la Figura 14 expone que las plantas tratadas con las diferentes dosis de aplicación de biochar presentaron valores de absorción de Cd relativamente similares entre ellas, lo que demuestra un comportamiento distinto a la primera campaña en la que el efecto de la aplicación de las diferentes concentraciones de la enmienda resultó más diferenciado. A pesar de ello, se aprecia una tendencia de incremento en la absorción de Cd en las raíces con un aumento en la dosis de biochar aplicado, de modo que con la dosis 30% presenta un valor de 1.06 mg Cd.kg⁻¹ de raíz y se observa una diferencia estadísticamente significativa con respecto a la dosis 0% (testigo) que tiene un promedio de 0.59 mg Cd.kg⁻¹ de raíz. Este comportamiento difiere al comportamiento del biochar a un largo plazo luego de ser aplicado al suelo como indican Yang *et al.* (2015).

En relación al análisis del tipo de biochar utilizado, se observa que el menor valor de absorción de cadmio en las raíces en esta segunda campaña se tiene con el biochar de cascarilla de arroz que presenta un 0.81 mg Cd.kg⁻¹ de raíz. Un valor ligeramente mayor se tiene con el biochar de bambú, presentando 0.86 mg Cd.kg⁻¹ de raíz (Figura 15). Este resultado coincide con la concentración de cadmio en la estructura de ambas enmiendas como se observa en el análisis (Tabla 6), siendo el biochar de bambú el que posee un mayor valor, lo que podría estar influyendo sobre este parámetro. Aun así, a diferencia de la primera campaña, no se observa diferencias significativas, lo que quiere decir que usar cualquiera de las dos enmiendas tendría un efecto similar en esta segunda campaña.

Tabla 14: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio radicular (mg Cd.kg^{-1}) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (mg Cd.kg^{-1})	Biochar de bambú (mg Cd.kg^{-1})
0	0.52 d	0.66 cd
7.5	0.82 abcd	0.75 bcd
15	0.74 cd	1.10 ab
30	1.16 a	0.94 abc

CV: 17.98 %

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

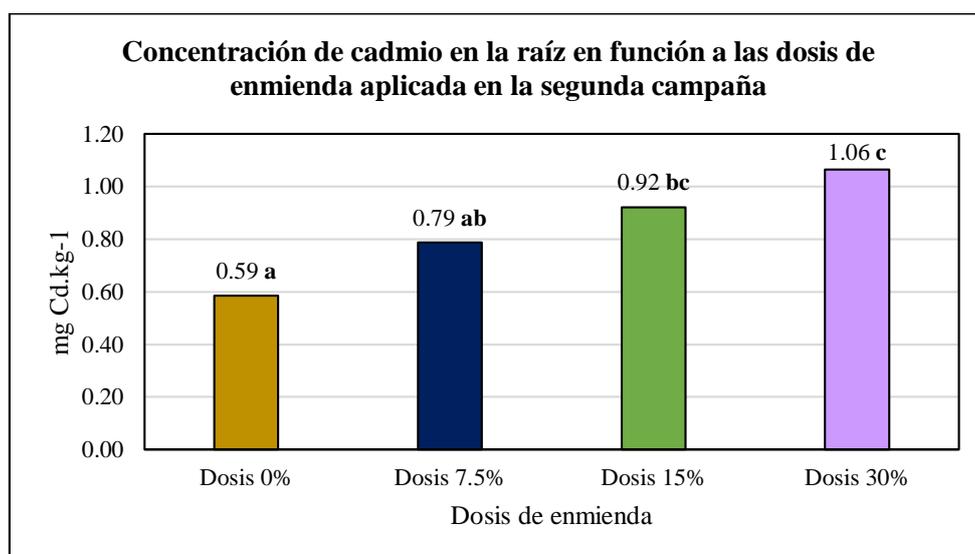


Figura 14: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la segunda campaña

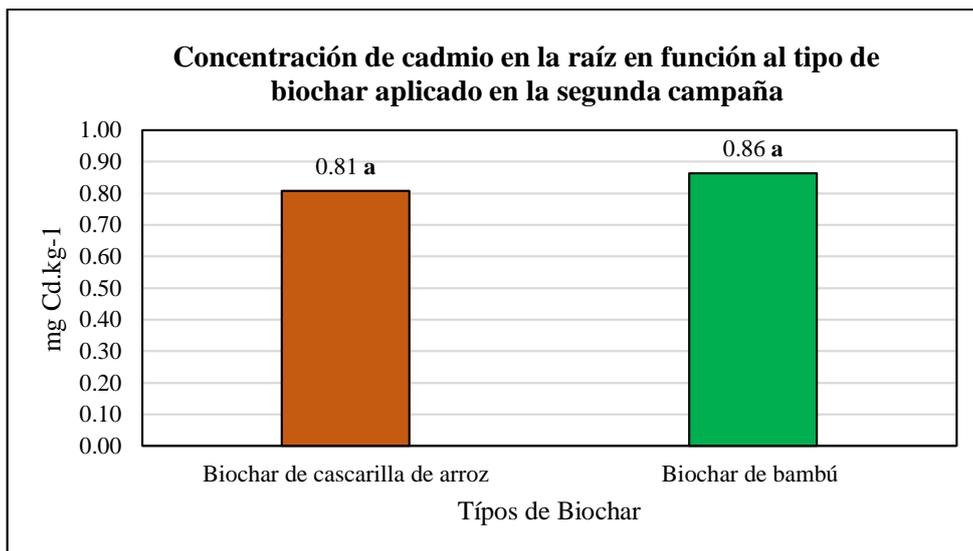


Figura 15: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la segunda campaña

El efecto del biochar es prolongado en el tiempo, Escalante *et al.* (2016) indican que un biochar maduro posee mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC) a diferencia de un biochar recién preparado, debido a la interacción y contacto de la enmienda con el oxígeno y el agua, lo que genera una mayor cantidad de cargas negativas en su superficie y así mejora también su capacidad de adsorción de metales pesados.

Yang *et al.* (2015) investigaron los efectos de dos tipos de biochar (cascarilla de arroz y bambú), dos tamaños de partícula luego del tamizado (<0.25 mm y <1 mm) y tres dosis de aplicación (0, 1 y 5%) sobre las características de un suelo franco arenoso, considerando un periodo de incubación de un año de las enmiendas con el fin de probar su efecto a largo plazo frente a las características de adsorción de cuatro metales pesados en sus superficies. Luego de un año de la aplicación de los tratamientos se observó que con la aplicación del biochar de cascarilla de arroz, a la dosis más alta y el tamaño de partícula más fino, una mejora en las características químicas del suelo y una mayor reducción del Cd extraíble en el suelo (25.8%), demostrando el buen desempeño de la enmienda luego de un año de incubación.

El biochar es una enmienda orgánica, por ende, presentará características dentro de esta clasificación. En esta investigación se utilizaron dos tipos de biochar que en esta segunda campaña demostraron tener una respuesta distinta a la primera, pues se observa que no hubo

diferencia significativa en el tipo de biochar utilizado y en su mayoría tampoco en la dosis de la enmienda, lo que podría indicar que la respuesta a un largo plazo no sería tan eficiente. De un modo diferente, se tiene lo afirmado por Beesley & Marmiroli (2011) en cuya investigación evaluaron la capacidad de inmovilización y retención del cadmio del suelo, como propiedad del biochar. Se usó para ello el método de las columnas, que consta de un sistema de seis columnas de vidrio en las que se acondiciona tratamientos con suelo y otros con biochar y por los que se deja transitar agua desionizada en una secuencia continua que sigue el orden: suelo - biochar. De esa manera se puede ver la eficiencia del biochar sobre la retención de cadmio en su superficie, evaluando las concentraciones de cadmio en solución resultantes por un periodo de tiempo. Con estas evaluaciones, se demostró un ligero aumento no significativo del cadmio en la solución en cada repetición que se hacía luego de unas semanas.

De acuerdo con todo lo anteriormente expuesto, es importante realizar un análisis con una evaluación más directa entre los dos periodos realizados. La Figura 16 muestra así, un análisis más detallado sobre la comparación entre la concentración de cadmio en las raíces entre la primera y segunda campaña de siembra.

Los valores de la concentración de cadmio en las raíces en la segunda campaña de siembra son menores que lo absorbido en la primera campaña en la mitad de los tratamientos, destacando entre estos los tratamientos de biochar de bambú a una dosis de 7.5% y de biochar de cascarilla de arroz con una dosis de 15% presentando un 0.75 y 0.74 mg Cd.kg⁻¹ de raíz respectivamente, que serían los que mejor respuesta han tenido sobre este parámetro. Sin embargo, se observa también que hay cuatro tratamientos (biochar de cascarilla de arroz con dosis de 7.5% y 30%, y biochar de bambú con dosis de 30% y 15%) que presentan una concentración de cadmio mayor, es decir que las plantas tratadas con estas enmiendas absorbieron más cadmio que en la primera campaña.

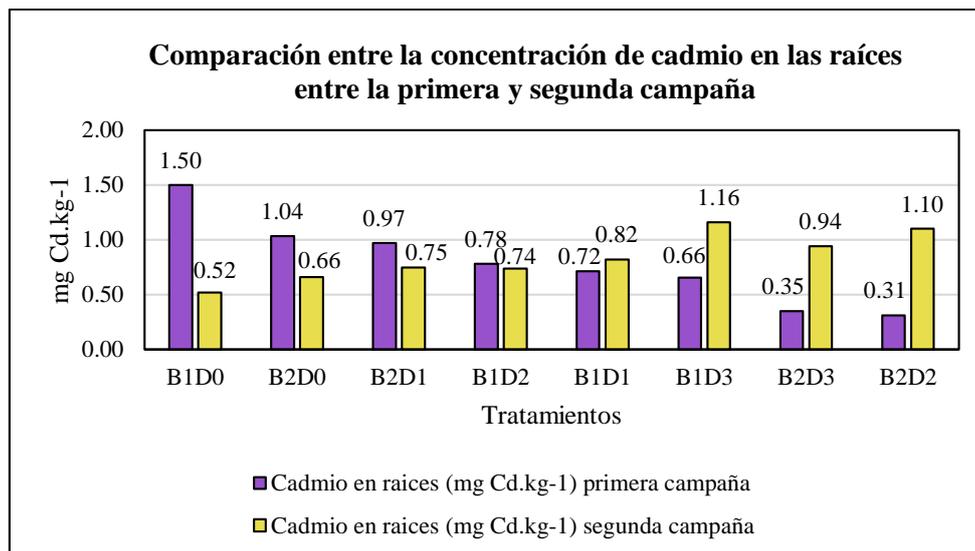


Figura 16: Comparación entre la concentración de cadmio en las raíces entre la primera y segunda campaña

Nota. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%

Este comportamiento se explica por la capacidad de intercambio catiónico de las enmiendas, pues como toda materia orgánica, el biochar adsorbe el metal pesado por la carga negativa superficial que posee y retiene a los cationes de Cd; pero cuando la enmienda ya se encuentra en gran parte saturada, la adsorción de los cationes es menos eficiente, lo que ocasionaría que el Cd en solución pase con mayor facilidad hacia la planta y sobre todo a la raíz que es donde principalmente se acumula en mayor cantidad. Otra explicación se da porque, como se mencionó al inicio, ambas enmiendas tenían una pequeña concentración de cadmio en su estructura, lo que pudo generar un aumento del Cd en solución por la variación de las características del medio. Por todo ello, es importante siempre hacer el análisis respectivo a las enmiendas que se utilizan.

4.3.2. Concentración de cadmio (Cd) en las hojas en la segunda campaña de siembra:

Al igual que en el caso del análisis de efecto residual en la raíz de las plantas, el análisis de varianza de la concentración de cadmio en la parte foliar en la segunda campaña de siembra muestra diferencias significativas en el factor dosis y la interacción entre tipo de biochar y dosis de aplicación. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha= 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación de esta enmienda sobre la absorción de cadmio en la

parte foliar de las plantas de maíz en la segunda campaña de siembra (Tabla 15, Anexo 13). Los resultados del análisis de varianza de lo evaluado en la Tabla 15 reflejan que las plantas tratadas con biochar de bambú tuvieron mejores resultados de forma general, a diferencia de las tratadas con cascarilla de arroz. Pese a esto, los valores de concentración de cadmio en las hojas de las plantas en esta segunda campaña son muy similares entre todos los tratamientos. Las mejores respuestas se observan con el uso de biochar de bambú a una dosis de 30% con un $0.16 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ de hoja, mientras que con el biochar de cascarilla de arroz se tiene un mejor resultado a una dosis del 0 y 7.5 % teniendo un 0.14 y $0.15 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ de hoja respectivamente. Por otro lado, en el caso de la dosis de aplicación, se observa que, aunque los resultados son similares, solo se obtuvo un valor distinto a los demás que fue el tratamiento con biochar de cascarilla de arroz al 30%, pues este genera un aumento a un valor de $0.57 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ de hoja.

Como se puede observar en la Figura 17, el resultado del análisis del factor dosis de aplicación de la enmienda muestra que en su mayoría las cuatro dosis no tuvieron diferencias significativas entre sí. Solo en las plantas tratadas con la dosis 30% se observa un efecto diferenciado, pues presentaron una concentración de $0.37 \text{ mg Cd. kg}^{-1}$ de hoja, siendo este el valor más alto y por ende la dosis menos efectiva en esta segunda campaña.

Por otro lado, se muestra el comportamiento de la aplicación de los dos tipos de biochar sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas. En esta segunda campaña, se observa un menor valor de concentración de cadmio en las hojas a diferencia de la primera campaña para ambos tratamientos, lo que podría ser un buen indicador de la efectividad del efecto residual. Además, de forma similar a la primera campaña, se observa que el mejor resultado se tiene con el biochar de bambú, pues la concentración de cadmio en las hojas es la más baja de ambas, presentando un promedio de $0.21 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$ de hoja. A pesar de esto, el resultado con el biochar de cascarilla de arroz es muy similar y no existe diferencia significativa entre ambos tratamientos, lo que indica que los dos tuvieron resultados favorables (Figura 18).

Tabla 15: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de cadmio foliar (mg Cd.kg^{-1}) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (mg Cd.kg^{-1})	Biochar de bambú (mg Cd.kg^{-1})
0	0.14 c	0.19 bc
7.5	0.15 c	0.32 b
15	0.21 bc	0.19 bc
30	0.57 a	0.16 bc

CV: 26.92 %

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

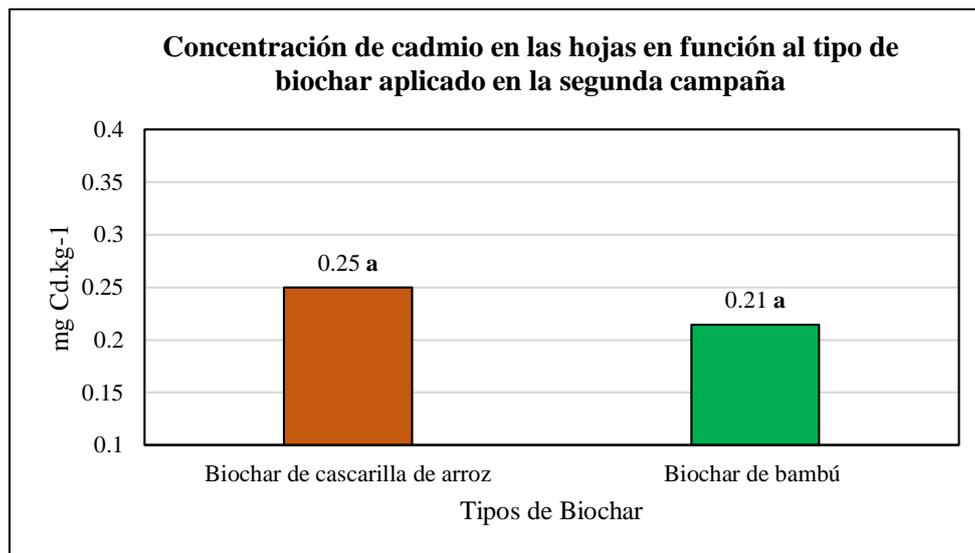


Figura 17: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña

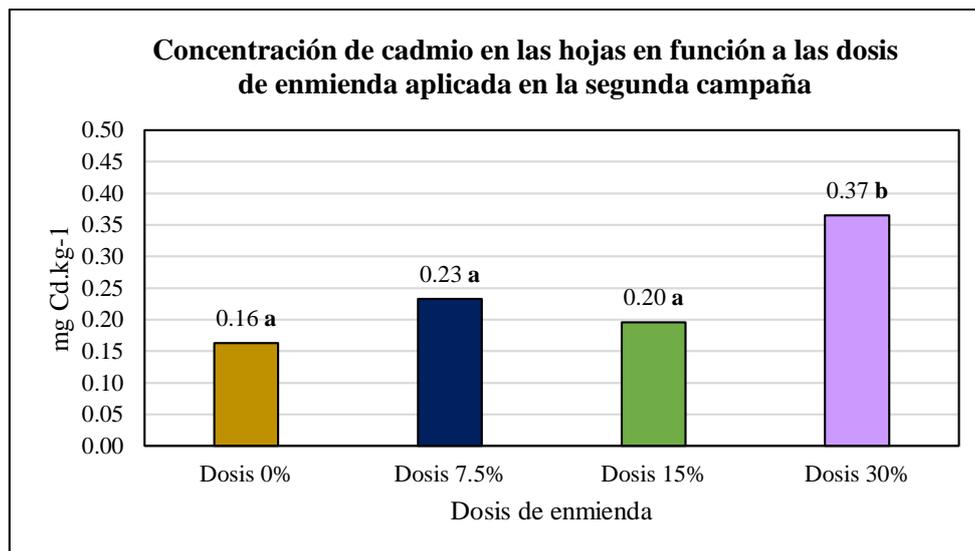


Figura 18: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña

En el estudio realizado por Lu *et al.* (2014), en el que se evalúa la capacidad de adsorción de biochar de bambú y biochar de cascarilla de arroz, se tuvo resultados ligeramente diferentes a los presentados. En este caso, una mayor eficiencia de inmovilización de cadmio y otros metales pesados se tuvo con el uso de biochar de cascarilla de arroz pirolizado a 500 °C, esto se debe a su alto valor de pH, la capacidad de intercambio catiónico encontrada, el contenido de cenizas y el contenido de grupos funcionales en su estructura. Como se observa, estas son las características de la enmienda que influyen principalmente en la propiedad de adsorción de metales pesados, las mismas que se encontraron en mayor proporción en el biochar de bambú en nuestra investigación.

Se observa que los valores de concentración de cadmio en las hojas son menores en comparación con la primera campaña, lo que podría significar un resultado positivo en relación al efecto residual del biochar en la parte foliar. Asimismo, pese a que en las raíces de las plantas la concentración de cadmio fue ligeramente mayor, en el caso de las hojas en esta segunda campaña los valores son muy bajos, esto se puede explicar de acuerdo a lo que dicen Zheng *et al.* (2012) que mencionan que el contenido de fósforo extraíble de la estructura del biochar, puede ingresar a las raíces de las plantas luego de la aplicación de la enmienda y formar con el cadmio compuestos fosfato metálicos que precipitan en las raíces y así disminuyen la traslocación del metal pesado a la parte aérea.

El análisis comparativo entre los resultados de la primera y segunda campaña enfocado a la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz se realiza con el fin de poder visualizar mejor el efecto residual de la aplicación de los dos tipos de biochar a cuatro diferentes dosis.

La Figura 19 muestra un comportamiento similar entre todos los tratamientos haciendo la comparación entre ambas campañas. Se observa una menor concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en casi todos los tratamientos en esta segunda campaña, siendo los más efectivos el tratamiento con biochar de cascarilla de arroz a las dosis de 7.5% y 15%, presentando valores de 0.15 y 0.21 mg Cd.kg⁻¹ de hoja respectivamente, además del tratamiento con biochar de bambú y dosis 30% y 15% con 0.16 y 0.19 mg Cd.kg⁻¹ de hoja.

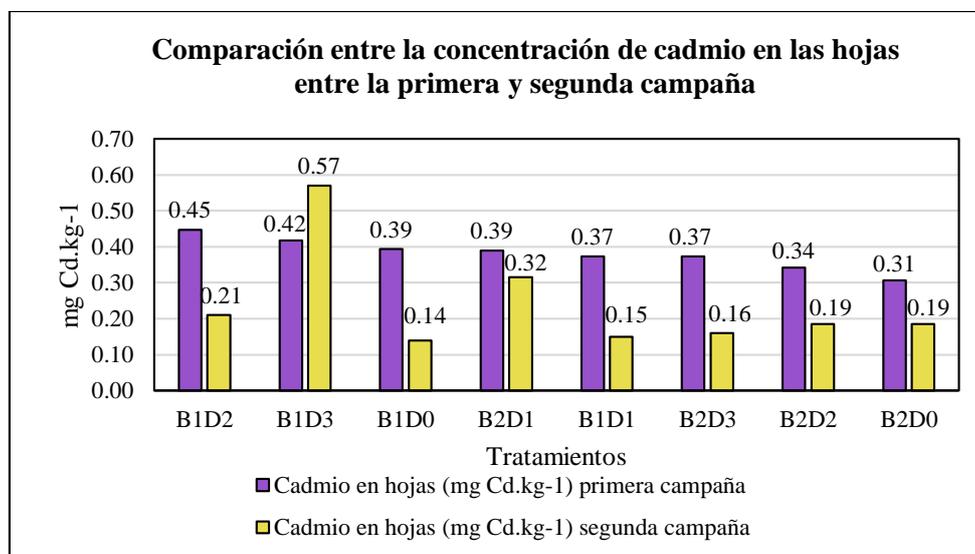


Figura 19: Comparación entre la concentración de cadmio en las hojas entre la primera y segunda campaña

Nota. B1: biochar de cascarilla de arroz, B2: biochar de bambú, D0: dosis 0%, D1: dosis 7.5%, D2: dosis 15% y D3: dosis 30%

Estos resultados refuerzan lo indicado por Beesley & Marmioli (2011), quienes concluyeron en su investigación que casi el total del cadmio adsorbido en la superficie del biochar utilizado se mantuvo retenido en la enmienda en mayor porcentaje y solo se observó una pequeña porción no significativa reversible en la solución suelo, por ende, existe poca probabilidad de que el efecto en el tiempo disminuya la capacidad de retención de la enmienda y aumente la concentración de cadmio en las plantas por esta vía.

Del mismo modo, Puga, Abreu, Melo & Beesley (2015) encontraron una respuesta positiva frente a la aplicación de biochar de caña de azúcar sobre la absorción de cadmio, en lo que resaltaron que no existe un efecto reversible del cadmio adsorbido por la enmienda por lo que se podría validar su efecto a largo plazo. Además, resaltaron que el efecto de la translocación del cadmio de la raíz a la parte aérea depende mucho de la especie vegetal que se está estudiando. Por último, el efecto encontrado en algunos tratamientos en los que se tiene mayor concentración de cadmio que en la primera campaña se puede explicar por el nivel de saturación que el biochar presenta con el metal pesado en la segunda campaña, lo que genera que no todo el cadmio presente sea retenido y este pueda acumularse más en los órganos de las plantas.

4.4. Análisis de absorción de nitrógeno foliar en plantas de maíz

El biochar es una materia orgánica que posee propiedades muy favorables que logran mejorar las características del suelo. No solo favorece la retención de metales pesados como el cadmio, sino que se enfoca también en mejorar su contenido nutricional y sus propiedades físicas. Como ya se mencionó antes, las propiedades fisicoquímicas del biochar derivan de la materia prima y condiciones de pirolisis de la que se origina, siendo la primera la que genera una mayor influencia sobre su composición estructural (Kookana *et al.*, 2011). El nitrógeno es un elemento importante en la nutrición de los cultivos, puesto que participa en los procesos de crecimiento y desarrollo de la parte vegetativa, forma parte de los aminoácidos y proteínas, es parte fundamental de la clorofila, entre otras funciones. Además, su deficiencia genera clorosis en las hojas y un bajo crecimiento de las plantas. Como parte de la investigación, se realiza un análisis del efecto de la aplicación de la enmienda sobre la absorción de nitrógeno en la parte foliar de las plantas de maíz.

4.4.1. Absorción de nitrógeno foliar en la primera campaña

En primer lugar, se realizó el análisis de varianza de la absorción de nitrógeno en la parte foliar de las plantas de maíz, en la que se muestra diferencias significativas en el factor biochar y la interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha = 0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación de esta enmienda sobre la absorción de nitrógeno foliar en las plantas de maíz (Tabla 16, Anexo 14).

En la Tabla 16 se observa el efecto de la aplicación de los dos tipos de biochar y cuatro dosis sobre la absorción de nitrógeno en la parte foliar. El mejor resultado se tuvo con la aplicación de biochar de bambú a una dosis de 7.5%, pues las hojas presentaron un valor de 1406.94 mg N.maceta⁻¹ a esta dosis, lo que representa las características de esta enmienda para mejorar la asimilación de nitrógeno en las plantas. Sin embargo, utilizando este biochar se ve una reducción de la absorción de nitrógeno a partir de esta dosis hasta la más alta, mientras que con el biochar de cascarilla de arroz se observa un aumento no tan marcado en este parámetro cuando se tiene un aumento de las dosis, teniendo así el mejor resultado con la dosis de 30% que presenta un valor de 953.95 mg N.maceta⁻¹. Del mismo modo, de forma general, se muestra que la asimilación de nitrógeno en las hojas de las plantas resulta mayor con la adición de cualquiera de las dos enmiendas, esto por sus propiedades como materia orgánica que permiten la mejora de las propiedades físicas y la fertilidad del suelo.

El factor tipo de biochar juega un papel importante en el efecto sobre la asimilación de nitrógeno por las plantas de maíz. El biochar de bambú presentó el mejor resultado en promedio sobre la asimilación de nitrógeno por las plantas con un valor de 1013.57 mg N.maceta⁻¹, en comparación con las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz que presentaron 801.74 mg N.maceta⁻¹; siendo ambos tratamientos estadísticamente diferentes (Figura 20).

Por otro lado, se ha estudiado el análisis de las cuatro dosis aplicadas de biochar, por lo que se realizó de manera independiente para poder conocer su efecto simple. En la Figura 21 se observa el efecto de la aplicación de las cuatro dosis de biochar sobre la absorción de nitrógeno foliar de las plantas de maíz. Los resultados reflejan una mejor respuesta con la dosis 7.5% presentando un valor de 1062.90 mg N.maceta⁻¹, el mismo que presenta diferencias significativas frente a la dosis 0% (sin aplicación de biochar) con 718.57 mg N.maceta⁻¹. Por otro lado, las dosis 15% y 30% presentaron cantidades de 928.81 mg N.maceta⁻¹ y 894.89 mg N.maceta⁻¹ respectivamente, las que también resultaron superiores a la dosis 0%, pero no son diferentes estadísticamente.

Tabla 16: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de nitrógeno foliar (mg N.maceta^{-1}) en plantas de maíz en la primera campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (mg N.maceta^{-1})	Biochar de bambú (mg N.maceta^{-1})
0	612.95 b	824.20 b
7.5	718.86 b	1406.94 a
15	921.19 ab	938.98 ab
30	953.95 ab	816.14 b
CV: 26.36 %		

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

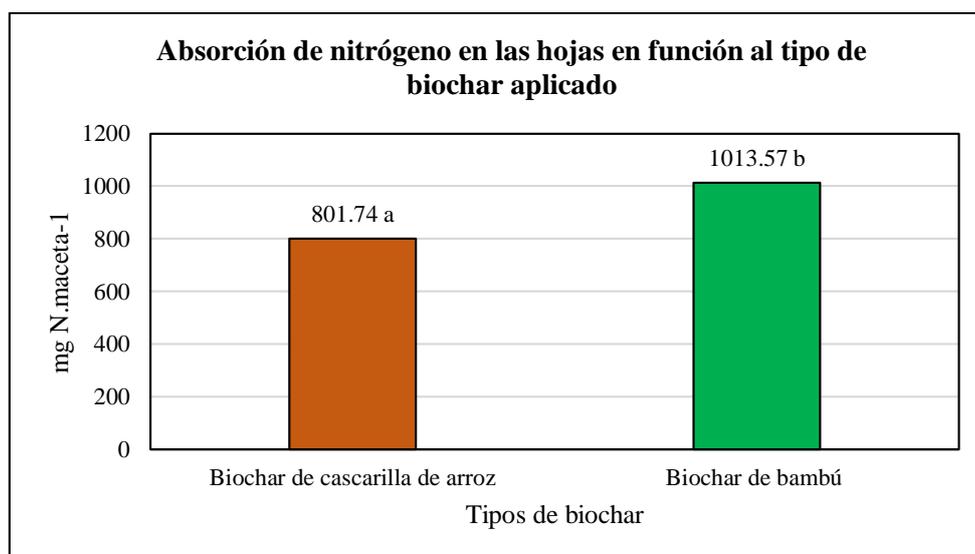


Figura 20: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz

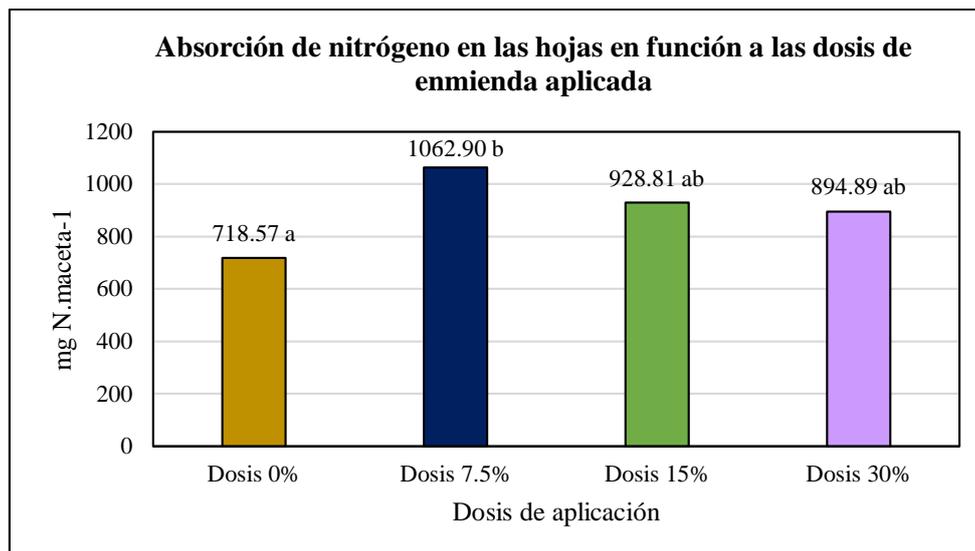


Figura 21: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz

El nitrógeno dentro de la materia orgánica sigue un proceso en el suelo que permite que las plantas puedan absorberlo para aprovecharlo como parte de la nutrición del cultivo. El nitrógeno orgánico es primero mineralizado por los microorganismos del suelo, de ese modo logran tener la energía necesaria para vivir y, asimismo, este se vuelve asimilable para las plantas. El amonio que resulta de este proceso puede ser absorbido de esa forma, aunque ese modo es el menos común. Para ello, el amonio primero debe pasar a ser amoniaco el mismo que, una vez dentro, demanda una cadena carbonatada para formar aminoácidos y proteínas. De otro modo, ocurre que el nitrógeno se asimila principalmente en la forma de nitrato, lo que ocurre con un gasto de energía, luego una vez dentro el nitrato formado se reduce a nitrito, consecuentemente este se reduce a amoniaco y se mueve por el xilema hacia otros órganos de reserva de la planta o en todo caso se une a los productos de la fotosíntesis para formar aminoácidos o proteínas (Balta, 2019).

De acuerdo con el análisis realizado a ambas enmiendas, se observa que, en cuanto a la concentración de nitrógeno en su composición estructural, el biochar de cascarilla de arroz tiene un mayor porcentaje de este elemento, lo que resulta diferente al comportamiento observado en la asimilación de nitrógeno por las plantas tratadas con ambas enmiendas, siendo el biochar de bambú el que presenta una mejor respuesta, lo que nos ayuda a concluir que estos dos parámetros no son necesariamente directamente proporcionales.

Camps-Arbestain, Shen, Wang, Van Zwieten & Novak (2017) indican que la concentración de nitrógeno dentro del biochar se encuentra dividido en nitrógeno orgánico e inorgánico. Principalmente el nitrógeno orgánico, que se encuentra en mayor porcentaje, no está disponible para las plantas porque forma parte de las estructuras aromáticas estables del biochar, mientras que una parte del nitrógeno inorgánico si puede ser absorbido por las plantas. Este último se encuentra en porcentajes muy pequeños dentro de la composición de la enmienda y presenta al nitrógeno en forma de nitrato que es el que según se indica podría provenir directamente de la materia prima de origen del biochar, y el nitrógeno en forma de amonio que es un producto directo de la descomposición de la biomasa por el proceso de pirólisis.

En la Tabla 6, se puede conocer la relación carbono nitrógeno (C:N) en las dos enmiendas utilizadas en la investigación, calculando el carbono desde el porcentaje de materia orgánica en su estructura y dividiendo este valor entre el porcentaje de nitrógeno. Normalmente una relación alta del parámetro indica que existe una menor cantidad de nitrógeno en relación al carbono y con ello la competencia entre las plantas y los microorganismos por el nitrógeno es alta, lo que genera deficiencia de este nutriente en las plantas. Sin embargo, como indican Kimetu *et al.* (2008), esto no ocurre en el biochar ya que este es un material recalcitrante, es decir la concentración de carbono que indica el análisis se mantiene constante, la enmienda tarda en descomponerse y con ello no se ve afectada la movilización y absorción del nitrógeno por las plantas.

De manera diferente a la composición estructural del biochar, se sabe que su aplicación al suelo mejora la retención de nutrientes. En el caso del nitrógeno lo hace mediante la adsorción de nitrato debido a los grupos funcionales básicos que también presenta la enmienda, logrando que este elemento se mantenga como una reserva en el suelo en un periodo regular de tiempo. De forma general, favorece la disponibilidad de los elementos en el suelo y con ello mejora el crecimiento de las plantas, pues gracias a su alta porosidad y superficie específica puede disminuir la densidad aparente y aumentar la capacidad de agua en el suelo, logrando una mejor dinámica de los nutrientes (Zhou, Berruti, Greenhalf, Tian & Henry, 2017).

Zhang *et al.* (2014) realizaron un estudio en el que se evaluó las propiedades de diversos tipos de biochar sobre sus características de humificación y sus propiedades como enmienda compostable. Como resultados se tuvo que el biochar de madera tuvo las mejores características para ser considerado una enmienda compostable por presentar los valores más altos de los parámetros evaluados, por otro lado, el biochar de bambú resultó menos certero que el primero, pues presentó un alto grado de carbonización y aromaticidad, lo que le da una mayor estabilidad en el suelo y reduce el proceso de mineralización de la enmienda, pero a su vez tuvo un bajo rango de materiales de humificación en su estructura y acidez superficial proporcionada por los grupos carboxilos, fenoles y lactonas lo que le resta propiedades de retención de iones y reducción de la actividad microbiana. Esta investigación permite poder predecir algunas de las características de nuestras enmiendas, sin embargo, es importante recordar que existen siempre ciertas variaciones en el comportamiento dependiendo de los diferentes procesos de obtención del biochar.

Kameyama, Miyamoto, Iwata & Shiono (2016) investigaron el efecto de la aplicación de biochar de diferentes materias primas, pirolizados a diferentes temperaturas, sobre la adsorción específicamente de nitrato en su superficie. En el estudio se observa una correlación muy fuerte entre el alto contenido de carbono en el biochar y consecuentemente una mayor adsorción de nitrato en su superficie ($r= 0.81$), es decir los tipos de biochar formados a partir de material maderable tuvieron mejores resultados en la adsorción de nitrato, siendo el tratamiento con biochar de cedro japonés el que presentó mayor valor de nitrato adsorbido con 230 mg.kg^{-1} de enmienda. Esto se explica por la mayor cantidad de grupos funcionales básicos concentrados en los bordes de carbono cristalino de la estructura del biochar, lo que genera menores pérdidas del nitrato por lixiviación. Se muestran resultados similares a los nuestros, en los que las plantas tratadas con biochar de bambú presentaron una mejor asimilación de nitrógeno que puede relacionarse a la mejor disponibilidad del mismo gracias a la aplicación de la enmienda. Por otro lado, el biochar de cascarilla de arroz puede presentar respuestas ligeramente positivas, pues las características del pH ácido de algunos de los grupos funcionales en su estructura pueden reducir el proceso de volatilización, disminuir las pérdidas de nitrógeno por esta vía y así mejorar su disponibilidad y absorción (Spokas, Novak & Venterea, 2012).

De algunas investigaciones, se sabe que la adsorción del nitrato ocurre en los sitios de cargas positivas que se pueden presentar en la superficie del biochar debido a los grupos funcionales básicos que existen. Segura (2018) indica que la capacidad de intercambio aniónico (CIA) del biochar está directamente relacionada al pH de la enmienda o del suelo. A un pH alto estos sitios tienen menos disponibilidad de retener aniones, esto por la competencia que puede ejercer la presencia de iones hidroxilo (OH^-), mientras que a un pH ácido este comportamiento resultaría diferente. Principalmente los aniones que pueden ser retenidos en la superficie de la enmienda son los nitratos y fosfatos, estos definen su comportamiento dependiendo de su concentración en la solución suelo y su dinámica con otros iones. Se conoce que la adsorción de fosfatos en el biochar está influenciada por las cargas positivas superficiales y por las reacciones de precipitación que tiene, lo que hace que se encuentre menos disponible a ser adsorbido a diferencia de los nitratos (Quiroga, 2019).

Una de las principales respuestas al comportamiento de nitrógeno en el biochar se relaciona con el sinergismo de este elemento con el potasio, sobre todo cuando el primero está en forma de nitrato, pues ambos reaccionan, promoviendo su asimilación y translocación dentro de las plantas, aun cuando se tiene una mínima adición de biochar. Muchos estudios analizan la relación entre la aplicación de biochar y la disponibilidad de potasio para las plantas. Widowati & Asnah (2014) lograron investigar esta relación obteniendo como resultado que una aplicación de biochar genera el aumento de la absorción de potasio por parte de las plantas, incluso indican que el porcentaje de absorción de este nutriente en las hojas aumenta en un 128%, la disponibilidad de potasio aumenta entre 69-89% y de nitrógeno total entre 39-53%.

Otro estudio que refleja este comportamiento es el de Lehmann *et al.* (2003), en el que se analiza la relación entre la aplicación de enmiendas con alto contenido de carbono sobre la absorción de nutrientes por las plantas en dos tipos de suelo. Los resultados mostraron una relación directa entre ambos parámetros, analizando específicamente el potasio, lo que indicaría que la adición de estas enmiendas aumenta la disponibilidad del potasio en el suelo y con ello, una mayor absorción por parte de las plantas. Esto se puede explicar posiblemente por el aumento de la capacidad de intercambio catiónico que incluso se puede incrementar en 50%, o por la mayor retención de agua que se tiene con la aplicación de las enmiendas estudiadas. La aplicación de biochar disminuye las pérdidas de nitrógeno en el suelo, gracias

a la alta capacidad de retención en la superficie de la enmienda. Sin embargo, se dice que una de las características que aseguran que este nitrógeno retenido pase posteriormente a ser absorbido por las raíces es la presencia de una gran cantidad de potasio en solución que es influenciado por el mismo biochar (Chen, Zhou & Zhu, 2008).

Balta (2019) analizó la absorción de nutrientes esenciales por parte de las plantas tratadas con biochar y con carbón activado. De manera específica para el biochar y el potasio, se conoce de una relación directa, es decir que a mayor dosis de aplicación de la enmienda se observa una mayor adsorción de potasio, lo que coincide con muchas investigaciones en las que se indica que la aplicación de enmiendas como el biochar generan una mayor retención y una consecuente asimilación y transporte del elemento para las plantas. Por otro lado, en el caso del nitrógeno se muestra un comportamiento similar a nuestra investigación en la que la aplicación de la enmienda a una dosis mínima se tiene una absorción alta de este nutriente, pero conforme la dosis aumenta, la absorción de nitrógeno disminuye. Básicamente lo que explica que en un inicio el nitrógeno tenga una muy buena absorción es la alta disponibilidad de potasio que hay en el suelo a esa misma dosis, por la sinergia que presenta con el ion nitrato.

4.4.2. Absorción de nitrógeno foliar en la segunda campaña

El análisis del efecto residual en el biochar permite conocer la eficiencia de sus propiedades a largo plazo. Es decir, si ocurre alguna modificación de las características de la enmienda luego de un buen tiempo de haberse aplicado al suelo, lo que podría generar un efecto diferente al encontrado en un inicio. Para poder evaluar el efecto residual del biochar sobre la absorción de nitrógeno en la parte foliar, se realizó la evaluación de la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en una segunda campaña, manteniendo el sustrato sin ninguna modificación.

El análisis de varianza de la absorción de nitrógeno en la parte foliar en la segunda campaña de siembra muestra diferencias significativas en el factor dosis y la interacción entre tipo de biochar y dosis de aplicación. Lo que quiere decir que a un nivel de significación de $\alpha=0.05$, se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar que existe interacción entre el tipo de biochar y la dosis de aplicación de esta enmienda sobre la absorción de nitrógeno en la parte foliar de las plantas de maíz en la segunda campaña de siembra (Tabla 17, Anexo

15). Los resultados mostrados en la Tabla 17 demuestran el efecto de los dos tipos de biochar y las cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de nitrógeno en la parte foliar de las plantas de maíz en una segunda campaña de siembra. Se observa que el tratamiento con mayor valor de nitrógeno absorbido en las hojas de las plantas resultó ser el de biochar de bambú a una dosis de 7.5%, presentando un valor de 1136.94 mg N.maceta⁻¹, cantidad muy similar y que no presenta diferencias significativas con las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz a una misma dosis, las cuales poseen 1094.74 mg N.maceta⁻¹. De manera similar a los resultados obtenidos en la primera campaña, se observa que en cuanto al biochar de bambú se repite el mismo comportamiento mediante el cual se tiene una absorción alta de nitrógeno a la dosis 7.5% y luego este valor va disminuyendo conforme aumentan las dosis, aunque este tratamiento con mejor respuesta no presenta diferencias significativas con el tratamiento testigo. En cuanto a las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz, se tiene que las dosis de 15% y 30% presentaron valores más bajos que las plantas con dosis de 7.5%, comportamiento diferente a lo que ocurre en la primera campaña utilizando esta enmienda.

Para poder analizar mejor el efecto residual, se realizó el análisis de efectos simples de cada uno de los factores. En primer lugar, se hace un enfoque en el tipo de biochar en esta segunda campaña de siembra, como se puede observar en la Figura 22. Al comparar de manera independiente las enmiendas no se encontraron diferencias significativas respecto a la absorción de nitrógeno en la segunda campaña. Las plantas tratadas con biochar de bambú registraron un promedio de 923.56 mg N.maceta⁻¹, mientras que las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz un promedio de 873.15 mg N.maceta⁻¹, siendo este valor ligeramente menor al primero por lo que la dinámica entre ambas enmiendas es similar a la primera campaña.

Por otro lado, la Figura 23 nos muestra la respuesta de la aplicación de cuatro dosis de biochar sobre la absorción de nitrógeno foliar en las plantas de maíz evaluadas en la segunda campaña de siembra. De manera similar a la primera evaluación, se tiene que las plantas tratadas con una dosis de biochar de 7.5% mostraron la mejor respuesta de absorción de nitrógeno, siendo este valor de 1115.84 mg N.maceta⁻¹, el mismo que es diferente estadísticamente a las otras dosis. Las dosis mayores a 7.5%, es decir la dosis de 15% y la de 30% de biochar aplicado presentaron valores menores de absorción de nitrógeno en las

plantas, con valores promedio de 849.43 mg N. maceta⁻¹ y 696.23 mg N.maceta⁻¹ respectivamente, siendo incluso más bajos a la dosis 0% (testigo), lo que podría estar reflejando el efecto adverso de la retención de nitrógeno por parte de las enmiendas en un tiempo prolongado.

Tabla 17: Efecto de dos tipos de biochar y cuatro dosis de aplicación sobre la absorción de nitrógeno foliar (mg N.maceta⁻¹) en plantas de maíz en la segunda campaña de siembra

Dosis de aplicación % (v.v ⁻¹)	Biochar de cascarilla de arroz (mg N.maceta ⁻¹)	Biochar de bambú (mg N.maceta ⁻¹)
0	788.30 cd	1042.76 abc
7.5	1094.74 ab	1136.94 a
15	785.84 cd	934.23 abc
30	807.25 bcd	612.80 d
CV: 13.52 %		

Nota. Análisis de efectos simples o diferencias de medias entre los tratamientos, realizado por la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

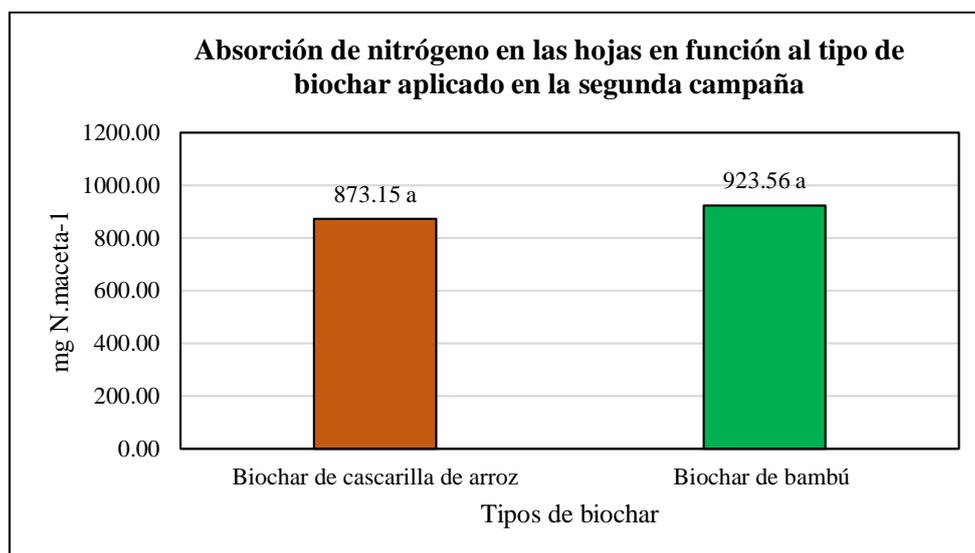


Figura 22: Efecto de los tipos de biochar aplicados como enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña

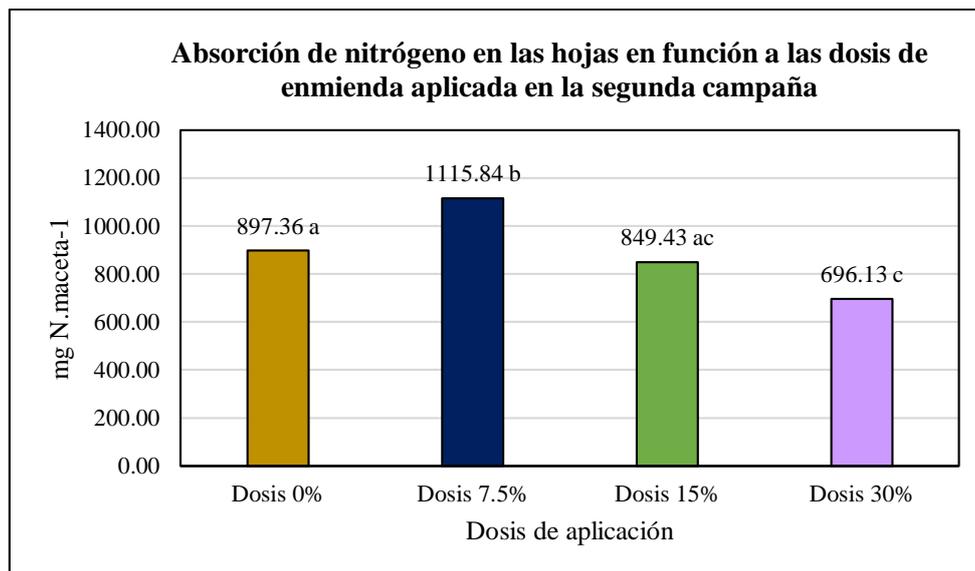


Figura 23: Efecto de las dosis de aplicación de la enmienda sobre la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña

De forma general, se observa una reducción de la absorción de nitrógeno en casi todos los tratamientos en esta segunda campaña en comparación con la primera, lo que podría estar indicando que, en un periodo largo de tiempo, ambas enmiendas reducen su eficiencia en relación a la respuesta de la absorción de nitrógeno por las plantas.

Las plantas tratadas con biochar de cascarilla de arroz tuvieron un ligero incremento en la absorción promedio de nitrógeno respecto a la primera evaluación, lo que podría explicarse por algunas características de esta enmienda que favorecen dicho comportamiento. Zhou *et al.* (2017) argumentan en un estudio realizado que una alta temperatura de pirólisis genera una alta porosidad en el biochar lo que a su vez aumenta al crecimiento microbiano a lo largo del tiempo, es decir como un efecto prolongado, hecho que mejoraría la dinámica del nitrógeno en el suelo. En consecuencia, la relación entre la elevada estructura porosa del biochar y la absorción del nitrógeno por las plantas a un largo plazo, podría explicar el comportamiento favorable del biochar de cascarilla de arroz en esta investigación, ya que teóricamente esta enmienda tendría una mayor porosidad porque no proviene de una biomasa maderable, lo que estaría generando una mayor actividad microbiana y con ello una mayor absorción de nitrógeno por las plantas como se refleja ligeramente en esta segunda campaña. Pese a la respuesta positiva del biochar de cascarilla de arroz, esta no logró ser superior a la absorción de nitrógeno que se tuvo por las plantas tratadas con el biochar de bambú. Aun

así, se observa que la absorción de nitrógeno foliar resultó menor que en la primera campaña con el uso de esta última enmienda, lo que generó que los tratamientos con ambos materiales orgánicos no presenten diferencias significativas. Lehmann *et al.* (2003) mencionan las características de una enmienda carbonatada para generar una mayor retención de nutrientes en su superficie, siendo en este caso la alta capacidad de intercambio catiónico, la difícil degradación en el tiempo y sobre todo el alto contenido de carbono del biochar de bambú, las que pueden influenciar en la concentración de nitrógeno disponible en una segunda campaña, por lo que ocurre esta pequeña reducción en la absorción del nutriente como respuesta.

Lentz & Ippolito (2012) investigaron el efecto de la aplicación de biochar y estiércol sobre un suelo calcáreo y las concentraciones de nutrientes absorbidos en el maíz para forraje. De forma general, se observa una pequeña influencia positiva en la concentración total de nitrógeno en el maíz para forraje el primer año de evaluación, sin embargo, en el segundo año en el que se evaluó este nutriente, el efecto fue diferente y negativo, pues la cantidad de nitrógeno absorbido fue menor hasta en un 52%, lo que generaba incluso síntomas de clorosis en las plantas. Una posible respuesta es que haya un ligero cambio en la naturaleza química del biochar lo que podría generar tal comportamiento. Estos resultados son similares a los obtenidos en nuestra investigación, pues también se puede observar una disminución en la absorción de nitrógeno en esta segunda campaña de siembra, aunque esta reducción es ligera en la mayoría de los casos.

Otros estudios indican que la aplicación de biochar podría limitar la disponibilidad y por ende la absorción de nitrógeno en los cultivos, debido a la alta relación C/N que posee la enmienda, lo que podría ser una respuesta que se estaría generando en un largo plazo sobre el comportamiento observado en nuestra investigación (Lehmann *et al.*, 2003).

V. CONCLUSIONES

1. La concentración más baja de cadmio se observó en las plantas de maíz tratadas con biochar de bambú a una dosis de 15 %, mostrando valores en promedio de 0.31 y 0.34 mg Cd.kg⁻¹ de material vegetal en la parte radicular y foliar de las plantas respectivamente. La respuesta a una dosis de 7.5 % también resulta parcialmente favorable, logrando apreciar un mejor efecto en la segunda campaña de siembra, pues en la primera las plantas aún poseen valores altos de cadmio en sus estructuras.
2. Existe un efecto positivo sobre la absorción de cadmio en las plantas de maíz con la aplicación del biochar, solo en la primera campaña de siembra, debido a las propiedades que posee la enmienda que mejoran la retención de metales pesados como el cadmio y así mismo reducen su absorción por las plantas.
3. La aplicación de biochar generó un efecto favorable sobre la producción de materia seca de las raíces y hojas de las plantas de maíz, especialmente a una dosis de 7.5%, ya que la incorporación de la enmienda mejora las propiedades físicas del suelo y con ello la disponibilidad de nutrientes para el cultivo.
4. El alto valor de capacidad de intercambio catiónico (28 meq.100g⁻¹), la mayor cantidad de lignina y el porcentaje alto de materia orgánica (88.45%), son las principales características por las que el biochar de bambú presentó mejores resultados sobre la retención de cadmio en su estructura.
5. La aplicación de biochar generó también buenos resultados sobre la absorción de nitrógeno por las plantas de maíz, gracias a que su aplicación mejora las características físicas del suelo, como la porosidad y área superficial, lo que mejora la retención y disminuye las pérdidas de nitrógeno en el suelo. Del mismo modo, se

observó una mejor respuesta con el biochar de bambú a una dosis de 7.5% obteniendo 1406.942 y 1136.94 mg de N foliar.planta⁻¹ en la primera y segunda campaña de siembra, lo que se explica con la relación entre la absorción de nitrógeno y la elevada cantidad de carbono en la enmienda y el aumento en la concentración de potasio disponible en el suelo.

6. El efecto residual de la aplicación de ambos tipos de biochar no resultó muy favorable en referencia a la concentración de cadmio específicamente en la parte radicular. Este comportamiento se explica porque el biochar llega a saturar sus sitios de intercambio catiónico en la primera campaña y por ende la adsorción de cadmio disponible en el suelo disminuye, logrando así mayores concentraciones del metal pesado en las plantas en la segunda campaña de siembra.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios considerando los mismos tipos y dosis de las enmiendas utilizadas, y que se maneje en condiciones reales de campo, teniendo en cuenta las labores agronómicas y los factores ambientales que puedan favorecer el desarrollo del cultivo.
- Efectuar estudios en los que se evalúe la aplicación del biochar de bambú con las dosis de 7.5 y 15 % de manera fraccionada en toda la campaña de siembra del cultivo, con el fin de buscar la mejora en la respuesta del efecto residual de la enmienda en la reducción de la concentración de cadmio en las plantas.
- Repetir esta investigación en otro cultivo de importancia agronómica y en el que actualmente se esté buscando soluciones ante el problema de cadmio en los suelos.
- Realizar siempre los análisis necesarios al biochar a utilizar antes de su aplicación para así conocer sus características y mejorar su efecto en la retención de metales pesados y reducción de pérdidas de iones como el nitrógeno usándolo en el momento y las condiciones adecuadas.
- Realizar estudios considerando evaluar el efecto de la aplicación del biochar de bambú sobre los otros macro y micronutrientes del suelo y así conocer mejor las propiedades de la enmienda en relación al crecimiento y desarrollo de los cultivos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abanto, M. (2016). *Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1949>
- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Farooq Qayyum, M., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J. & Sik Ok, Y. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum L.*) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, 37-47. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.02.028
- Adriano, D.C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biochemistry, Bioavailability and Risk of Metals*. Springer. doi: 10.1007/978-0-387-21510-5_8
- Ahmad, I., Akhtar, M.J., Zahir, Z.A. & Mitter, B. (2014). Organic amendments: effects on cereals growth and cadmium remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 2912-2928. doi: 10.1007/s13762-014-0695-8
- Alloway, B.J. & Steinnes, E. (1999). Anthropogenic Additions of Cadmium to Soils. En M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soils and Plants* (p. 97-123). doi: 10.1007/978-94-011-4473-5_5
- Antal, M.J. & Gronli, M. (2003). The Art, Science and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619-1640. doi: 10.1021/ie0207919
- Balta, R. (2019). *El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (Solanum lycopersicum L.) bajo invernadero* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3874>

- Beccaloni, E., Vanni, F., Baccaloni, M. & Carere, M. (2013). Concentrations of arsenic, cadmium, lead and zinc in homegrown vegetables and fruits: Estimated intake by population in an industrialized area of Sardinia, Italy. *Microchemical Journal*, 107, 190-195. doi: 10.1016/j.microc.2012.06.012
- Beesley, L. & Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), 474-480. doi: doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016
- Bienvenido, J. (1985). Rice: Chemistry and Technology. Washington D. C., USA: American Association for Clinical Chemistry.
- Bingham, F.T., Page, A. L., Mahler, R.J. & Ganje, T.J. (1975). Growth and Cadmium Accumulation of Plants Grown on a Soil Treated with a Cadmium-Enriched Sewage Sludge. *Journal of Environmental Quality*, 4(2), 207-211. doi: 10.2134/jeq1975.00472425000400020015x
- Brownsort, P.A. (2009). Biomass pyrolysis processes: Performance parameters and their influence on biochar system benefits (Tesis de Maestría). University of Edinburgh. Recuperado de <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/3116>
- Caballero, Y. (2010). Determinación comparativa de ceniza, extractivo, celulosa y lignina en las especies de bambú procedente del bosque reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperado de <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/571>
- Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Wang, T., Van Zwieten, L. & Novak, J. (2017). Available nutrients in biochar. En B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.), *Biochar a guide to analytical methods* (p. 109-125). Boca Ratón, USA: CRC Press.
- Cárdenas, A. (2012). Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la cooperativa agraria industrial Naranjillo - Tingo María - Perú (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>
- Chan, D. Y. & Hale, B. A. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*, 55(408), 2571-2579. doi: 10.1093/jxb/erh255
- Chan, K. Y. & Xu, Z. (2009). Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. En J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (p. 67-84). Abingdon, United Kingdom: Earthscan.

- Chen, B., Zhou, D. & Zhu, L. (2008). Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Biochars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures. *Environmental Science & Technology*, 42(14), 5137-5143. doi: 10.1021/es8002684
- Clemens, S., Palmgren, M.G. & Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7(7), 309-315. doi: 10.1016/S1360-1385(02)02295-1
- De Meuûs, C., Eduljee, G.H. & Hutton, M. (2002). Assessment and management of risks from exposure to cadmium in fertilisers. *The Science of the Total Environment*, 291(1-3), 167-187. doi: 10.1016/S0048-9697(01)01098-1
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E. & Etchevers, J.D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367
- Fergusson, J.E. (1990). *The Heavy Metals: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Nueva York, USA: Pergamon Press.
- Gao, X. & Masiello, C.A. (2017). Analysis of biochar porosity by picnometry. En B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.), *Biochar a guide to analytical methods* (p. 132-140). Boca Ratón, USA: CRC Press.
- García, A. (1989). Cadmio y Medio Ambiente. *Revista Técnica de Medio Ambiente – RETEMA*, 8, 105-109. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/31763>
- Gaskin, J.W., Steiner, C., Harris, K., Das, K.C. & Bibens, B. (2008). Effect of Low-temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 51(6), 2061-2069. doi: 10.13031/2013.25409
- González, A. (2010). Determinación y validación de cadmio total e intercambiable en algunos suelos cacaoteros del departamento de Santander (Tesis de pre-grado). Universidad Industrial de Santander). Colombia.
- Graber, E.R., Singh, B., Hanley, K. & Lehmann, J. (2017). Determination of cation exchange capacity in biochar. En B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.), *Biochar a guide to analytical methods* (p. 74-84). Boca Ratón, USA: CRC Press.
- 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

- (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria, La Molina. Lima, Perú.
Recuperado de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1895>
- Huaynates, J.L. (2013). Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Recuperado de <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/451>
- Järup, L. & Åkesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3), 201-208. doi: 10.1016/j.taap.2009.04.020
- Kaal, J. & Calvelo, R. (2017). Pyrolysis-GC-MS of biochar. En B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.), *Biochar a guide to analytical methods* (p. 170-186). Boca Ratón, USA: CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Ratón, USA: CRC Press.
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Iwata, Y. & Shiono, T. (2016). Influences of feedstock and pyrolysis temperatura on the nitrate adsorption of biochar. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62(2), 180-184. doi: 10.1080/00380768.2015.1136553
- Kimetu J., Lehmann, J. Ngoze, S., Mugendi, D., Kinyangi, J., Riha, S., Verchot, L., Recha, J. & Pell, A. (2008). Reversibility of Soil Productivity Decline with Organic Matter of Differing Quality Along a Degradation Gradient. *Ecosystems*, 11, 726-739. doi: 10.1007/s10021-008-9154-z
- Kookana, R.S., Sarmah, A.K., Van Zwieten, L., Krull, E. & Singh, B. (2011). Biochar Application to Soil: Agronomic and Environmental Benefits and Unintended Consequences. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy: Volumen 112* (p. 103-143). doi: 10.1016/B978-0-12-385538-1.00003-2
- Lagriffoul, A., Mocquot, B., Mench, M. & Vangronsveld, J. (1998). Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays L.*). *Plant and Soil*, 200, 241-250. doi: 10.1023/A:1004346905592
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T. Zech, W. & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343-357. doi: 10.1023/A:1022833116184

- Lehmann, J. & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: An Introduction. En J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (p. 1-9). Recuperado de <https://biochar-international.org/book/>
- LENNTECH. (s.f.). Cadmio – Cd: Propiedades químicas del cadmio, efectos del cadmio sobre la salud, efectos ambientales del cadmio. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>
- Lentz, R.D. & Ippolito, J.A. (2011). Biochar and Manure Affect Calcareous Soil and Corn Silage Nutrient Concentrations and Uptake. *Journal of Environmental Quality*, 41(4) 1033-1043. doi: 10.2134/jeq2011.0126
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J. & Neves, G. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1719-1730. doi: 10.2136/sssaj2005.0383
- Li, Y., Shen, F., Guo, H., Wang, Z., Yang, G., Wang, L., Zhang, Y., Zeng, Y. & Deng, Sh. (2015). Phytotoxicity assessment on corn stover biochar, derived from fast pyrolysis, based on seed germination, early growth, and potential plant cell damage. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12), 9534-9543. doi: 10.1007/s11356-015-4115-5
- Liu, Y., Wang, Y., Lu, H., Lonappan, L., Kaur Brar, S., He, L. Chen, J. & Yang, S. (2018). Biochar application as a soil amendment for decreasing cadmium availability in soil and accumulation in Brassica chinensis. *Journal in Soils and Sediments*, 18, 2511-2519. doi: 10.1007/s11368-018-1927-1
- Lu, K., Yang, X., Shen, J., Robinson, B., Huang, H., Liu, D., Bolan, N., Pei, J. & Wang, H. (2014). Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb, and Zn to *Sedum plumbizincicola*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191, 124-132. doi: 10.1016/j.agee.2014.04.010
- Ma, Y. & Matsunaka, T. (2013). Biochar derived from dairy cattle carcasses as an alternative source of phosphorus and amendment for soil acidity. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(4), 628-641. doi: 10.1080/00380768.2013.806205
- Mahmoud, E., Ibrahim, M. Ali, N. & Ali, H. (2020). Effect of Biochar and Compost Amendements on Soil Biochemical Properties and Dry Weight of Canola Plant Grown in Soil Contaminated with Heavy Metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(12), 1561-1571. doi: 10.1080/00103624.2020.1763395

- Manolikaki, I., Diamadopoulos, E. (2019). Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(5), 512-526. doi: 10.1080/00103624.2019.1566468
- McLaughlin, M.J. & Singh, B.R. (1999). Cadmium in Soils and Plants, A Global Perspective. En M. J. McLaughlin & B. R. Singh (Eds.), *Cadmium in Soil and Plants* (p. 1-9). doi: 10.1007/978-94-011-4473-5_1
- Melgarejo, V. (15 de enero de 2019). Agricultores de cacao empiezan a dejar sus cultivos ante exigencias de la Unión Europea. Gestión. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/agricultores-cacao-empieza-dejar-cultivos-exigencias-union-europea-255722-noticia/?ref=gesr>
- Melo, L.C., Coscione, A.R., Abreu, C.A., Puga, A.P. & Camargo, O.A. (2013). Influence of Pyrolysis Temperature on Cadmium and Zinc Sorption Capacity of Sugar Cane Straw-Derived Biochar. *BioResources*, 8(4), 4992-5004. doi: 10.15376/biores.8.4.4992-5004
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2019). *Requerimientos Agroclimáticos del cultivo de Maíz Amarillo Duro*. Lima: MINAGRI. Recuperado de <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/MIDAGRI/235>
- Naidu, R., Bolan, N.S., Kookana, R.S. & Tiller, K.G. (1994). Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the Surface charge of soils. *European Journal of Soil Science*, 45(4), 419-429. doi: 10.1111/j.1365-2389.1994.tb00527.x
- Nigam, R., Srivastava, S., Prakash, S. & Srivastava, M.M. (2001). Cadmium mobilisation and plant availability – the impact of organic acids commonly exuded from roots. *Plant and Soil*, 230(1), 107-113. doi: 10.1023/A:1004865811529
- Novak, J., Busscher, W., Laird, D., Ahmedna, M., Watts, D. & Niandou, M. (2009). Impact of Biochar Amendment on Fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. *Soil Science*, 174(2), 105-112. doi: 10.1097/SS.0b013e3181981d9a
- Ortíz, M. (18 de julio de 2018). A la búsqueda del origen del cadmio en el cacao. Redagrícola. Recuperado de <https://www.redagricola.com/pe/a-la-busqueda-del-origen-del-cadmio-en-el-cacao/>
- Orroño, D. (2011). Acumulación de metals (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género *Pelargonium*: suministro desde el suelo, ubicación de la planta y toxicidad (Tesis de Doctorado). Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de

https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/FAUBA_4ba911b0daa8ed156613fc3ab78895f3

- Park, J.H., Choppala, G.K., Bolan, N.S., Chung, J.W. & Chuavasathi, T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, 439-451. doi: 10.1007/s11104-011-0948-y
- Pinto, E., Sigaud-kutner, T., Leitão, M., Okamoto, O., Morse, D. & Colepicolo, P. (2003). Heavy Metal-induced oxidative stress in algae. *Journal of Phycology*, 39(6), 1008-1018. doi: 10.1111/j.0022-3646.2003.02-193.x
- Puga, A.P., Abreu, C.A., Melo, L.C.A. & Beesley, L. (2015). Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management*, 159, 86-93. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.05.036
- Quiroga, K. (2019). Biocarbonizados en la agricultura: adsorción y desorción de nutrientes y/o contaminantes orgánicos (Trabajo de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76211>
- Sales, B.K., Bryla, D.R., Trippe, K.M., Scagel, C.F., Strik, B.C. & Sullivan, D.M. (2022). Biochar as an Alternative Soil Amendment for Establishment of Northern Highbush Blueberry. *HortScience*, 57(2), 277-285. doi: 10.21273/HORTSCI16257-21
- Sánchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio (Trabajo Fin de Grado). Universidad Complutense de Madrid. España. Recuperado de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/>
- Schmidt, M.W. & Noack, A.G. (2000). Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3), 777-793. doi: 10.1029/1999GB001208
- Segura, D. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta (Proyecto final de Graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica). Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10315>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2018). *Red de estaciones en Lima, datos hidrometeorológicos históricos*. Lima: SENAMHI. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Shi, Y., Huang, Z., Liu, X., Imran, S., Peng, L., Dai, R. & Deng, Y. (2016). Environmental materials for remediation of soils contaminated with lead and cadmium using maize (*Zea mays L.*) growth as a bioindicator. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), 6168-6178. doi: 10.1007/s11356-015-5778-7

- Smolders, E. & Mertens, J. (2013). Cadmium. En B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (p. 283-311). doi: 10.1007/978-94-007-4470-7_10
- Song, Y., Jin, L. & Wang, X. (2016). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International Journal of Phytoremediation*, 19(2), 133-141. doi: 10.1080/15226514.2016.1207598
- Spokas, K.A., Novak, J.M. & Venterea, R.T. (2012). Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. *Plant Soil*, 350, 35-42. doi: 10.1007/s11104-011-0930-8
- Sun, C.X., Chen, X., Cao, M.M., Li, M.Q. & Zhang, L. (2017). Growth and metabolic responses of maize roots to straw biochar application at different rates. *Plant Soil*, 416, 133-141. doi: 10.1007/s11104-017-3229-6
- Sun, J., Lian, F., Liu, Z., Zhu, L. & Song, Z. (2014). Biochars derived from various crop straws: Characterization and Cd(II) removal potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 226-231. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.04.042
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J. & Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, 23(1), 86-101. Recuperado de <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/3282>
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., Van der Velde, M. & Diafas, I. (2010). Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxemburgo: European Commission. Recuperado de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC55799>
- Wang, M., Zou, J., Duan, X., Jiang, W. & Liu, D. (2007). Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays L.*). *Bioresource Technology*, 98(1), 82-88. doi: 10.1016/j.biortech.2005.11.028
- Wang, Y., Zhang, K., Lu, L., Xiao, X. & Chen, B. (2020). Novel insights into effects of silicon-rich biochar (Sichar) amendment on cadmium uptake, translocation and accumulate in rice plants. *Environmental Pollution*, 265, 114772. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114772
- Widowati, W. & Asnah, A. (2014). Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation. *Journal of Agricultural Science*, 6(2), 24-32. doi: 10.5539/JAS.V6N2P24

- Xu, P., Sun, C.X., Ye, X.Z., Xiao, W.D., Zhang, Q. & Wang, Q. (2016). The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 94-100. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.05.031
- Xu, W., Jia, L., Shi, W., Baluska, F., Kronzucker, H. J., Liang, J. & Zhang, J. (2013). The Tomato 14-3-3 Protein TTF4 Modulates H⁺ Efflux, Basipetal Auxin Transport, and the PKS5-J3 Pathway in the Root Growth Response to Alkaline Stress. *Plant Physiology*, 163(4), 1817-1828. doi: 10.1104/pp.113.224758
- Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z. & Wang, H. (2015). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 974-984. doi: 10.1007/s11356-015-4233-0
- Yzarra, W., Trebejo, I., Noriega, V. & Jacobo, T. (2010). Evaluación del efecto del clima en la producción y productividad del maíz amarillo duro en la costa central del Perú. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Zhang, J., Lü, F., Luo, C., Shao, L. & He, P. (2014). Humification characterization of biochar and its potential as a composting amendment. *Journal of Environmental Sciences*, 26(2), 390-397. doi: 10.1016/S1001-0742(13)60421-0
- Zheng, H., Zhengyu, W., Deng, X., Herbert S. & Xing, B. (2013). Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*, 206, 32-39. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.018
- Zheng, R.L., Cai, C., Liang, J.H., Huang, Q., Chen, Z., Huang, Y.Z., Arp, H.P.H. & Sun, G.X. (2012). The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa L.*) seedlings. *Chemosphere*, 89(7), 856-862. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.05.008
- Zhou, Y., Berruti, F., Greenhalf, C., Tian, X. & Henry, H.A.L. (2017). Increased retention of soil nitrogen over winter by biochar application: Implications of biochar temperature for plant nitrogen availability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 61-68. doi: 10.1016/j.agee.2016.11.011

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Datos de materia seca (g.maceta⁻¹) de raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña

Tratamiento	Repetición	Materia seca (g.maceta ⁻¹)	
		Raíz	Hojas
BD0	R1	4.902	51.237
	R2	4.697	45.088
	R3	5.906	40.643
	R4	5.878	41.037
B1D1	R1	7.605	44.366
	R2	4.708	41.77
	R3	-	52.705
	R4	5.335	58.116
B1D2	R1	5.06	54.6
	R2	6.261	82.954
	R3	5.321	67.154
	R4	6.387	52.458
B1D3	R1	5.11	42.861
	R2	4.138	61.846
	R3	2.289	41.727
	R4	5.945	46.263
B2D1	R1	9.107	76.389
	R2	7.471	72.644
	R3	8.15	119.536
	R4	6.795	87.738
B2D2	R1	2.661	48.163
	R2	3.569	53.785
	R3	3.56	56.276
	R4	1.985	99.723
B2D3	R1	4.211	54.868
	R2	2.555	87.371
	R3	2.43	49.846
	R4	2.064	57.284

Anexo 2: Datos de materia seca (g.maceta⁻¹) de raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña

Tratamiento	Repetición	Materia seca (g,maceta ⁻¹)	
		Raíz	Hojas
BD0	R1	3.851	61.601
	R2	3.106	60.016
	R3	5.013	51.493
	R4	4.422	60.295
B1D1	R1	7.638	76.205
	R2	5.252	74.844
	R3	7.223	69.64
	R4	8.824	72.115
B1D2	R1	5.774	47.777
	R2	4.545	45.47
	R3	2.06	55.173
	R4	2.942	44.094
B1D3	R1	2.79	37.275
	R2	-	-
	R3	3.42	30.986
	R4	3.651	36.838
B2D1	R1	4.683	53.793
	R2	2.53	49.783
	R3	2.33	45.935
	R4	6.518	65.993
B2D2	R1	3.56	45.479
	R2	4.845	47.333
	R3	5.685	68.954
	R4	5.799	49.73
B2D3	R1	6.54	35.939
	R2	3.13	32.181
	R3	4.172	28.018
	R4	3.52	24.926

Anexo 3: Concentración de cadmio (mg.kg^{-1}) en raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña

Tratamiento	Repetición	Cd (mg.kg^{-1})	
		Raíz	Hojas
B1D0	R1	0.71	0.35
	R2	1.8	0.58
	R3	1.09	0.44
	R4	1.61	0.39
B1D1	R1	0.99	0.35
	R2	0.59	0.41
	R3	0.53	0.56
	R4	0.75	0.36
B1D2	R1	0.96	0.54
	R2	0.95	0.43
	R3	0.58	0.39
	R4	0.64	0.43
B1D3	R1	0.99	0.38
	R2	1.29	0.4
	R3	0.38	0.51
	R4	0.6	0.38
B2D0	R1	1.23	0.23
	R2	0.89	0.3
	R3	0.99	0.55
	R4	1.03	0.39
B2D1	R1	1.31	0.4
	R2	1.14	0.38
	R3	0.93	0.33
	R4	0.5	0.45
B2D2	R1	0.44	0.3
	R2	0.46	0.35
	R3	0.1	0.36
	R4	0.25	0.36
B2D3	R1	0.26	0.38
	R2	0.51	0.4
	R3	0.28	0.41
	R4	0.34	0.3

Anexo 4: Concentración de cadmio ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en raíz y hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña

Tratamiento	Repetición	Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
		Raíz	Hojas
B1D0	R1	0.38	0.15
	R2	0.45	0.18
	R3	0.63	0.1
	R4	0.6	0.13
B1D1	R1	0.8	0.1
	R2	0.73	0.1
	R3	0.8	0.25
	R4	0.93	0.15
B1D2	R1	0.78	0.2
	R2	0.8	0.15
	R3	0.53	0.28
	R4	0.85	0.53
B1D3	R1	1.15	0.45
	R2	1.28	-
	R3	0.93	0.63
	R4	1.28	0.63
B2D0	R1	0.73	0.18
	R2	0.53	0.15
	R3	0.83	0.23
	R4	0.53	0.18
B2D1	R1	0.7	0.38
	R2	0.65	0.35
	R3	1.18	0.3
	R4	0.9	0.23
B2D2	R1	1.08	0.23
	R2	1.2	0.23
	R3	1.18	0.1
	R4	0.95	0.18
B2D3	R1	0.88	0.1
	R2	0.7	0.18
	R3	1.23	0.43
	R4	1.75	0.2

Anexo 5: Contenido de nitrógeno (mg N.planta⁻¹) en hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la primera campaña

Tratamiento	Repetición	Nitrógeno	
		Porcentaje (%)	mg N.planta ⁻¹
B1D0	R1	1.54	648.7558
	R2	1.4	679.532
	R3	1.484	545.39968
	R4	1.54	578.1006
B1D1	R1	1.652	732.92632
	R2	1.232	514.6064
	R3	1.792	944.4736
	R4	1.176	683.44416
B1D2	R1	2.016	1100.736
	R2	0.728	603.90512
	R3	1.68	1128.1872
	R4	1.624	851.91792
B1D3	R1	2.688	1152.10368
	R2	1.456	900.47776
	R3	1.68	701.0136
	R4	2.296	1062.19848
B2D0	R1	1.904	1148.98784
	R2	1.4	582.932
	R3	1.736	891.5228
	R4	1.512	673.35408
B2D1	R1	1.54	1176.3906
	R2	1.54	1118.7176
	R3	1.596	1907.79456
	R4	1.624	1424.86512
B2D2	R1	1.708	822.62404
	R2	1.54	828.289
	R3	2.072	1166.03872
	R4	1.708	1703.26884
B2D3	R1	1.932	1060.04976
	R2	1.736	1516.76056
	R3	1.82	907.1972
	R4	0.84	481.1856

Anexo 6: Contenido de nitrógeno (mg N.planta⁻¹) en hojas de maíz, bajo la aplicación de dos tipos de biochar y cuatro dosis en la segunda campaña

Tratamiento	Repetición	Nitrógeno	
		Porcentaje (%)	mg N.planta ⁻¹
B1D0	R1	1.288	710.5252
	R2	1.512	780.25248
	R3	1.316	830.7908
	R4	1.484	831.64844
B1D1	R1	1.456	1109.5448
	R2	1.512	1131.64128
	R3	1.736	1208.9504
	R4	1.288	928.8412
B1D2	R1	1.848	882.91896
	R2	1.372	623.8484
	R3	1.288	710.62824
	R4	2.1	925.974
B1D3	R1	2.408	897.582
	R2	-	-
	R3	2.156	668.05816
	R4	2.324	856.11512
B2D0	R1	1.316	895.36692
	R2	1.652	1130.41404
	R3	1.764	703.05984
	R4	1.708	1102.49692
B2D1	R1	2.408	1295.33544
	R2	2.212	1101.19996
	R3	1.988	913.1878
	R4	1.876	1238.02868
B2D2	R1	1.736	789.51544
	R2	1.988	940.98004
	R3	2.128	1467.34112
	R4	2.156	1072.1788
B2D3	R1	1.708	613.83812
	R2	2.1	675.801
	R3	2.128	596.22304
	R4	2.268	565.32168

Anexo 7: Prueba estadística para los datos obtenidos de la producción de materia seca radicular en la primera campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la producción de materia seca en la raíz de las plantas de maíz en la primera campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Tratamientos	6	74.20	12.367	14.46	0.00000349	***
Error	19	16.25	0.855			
Nivel de significación		0	***	0.001	**	0.01
		*	0.5	!	0.1	'' 1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos, por ende, se recurre al análisis de comparación de medias de Tukey.

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
0.8550044	19	5.0696	18.23934

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Tratamientos	7	4.645036	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
BD0	5.34550	0.636363	4	4.697	5.906	b
B1.D1	5.88267	1.524174	3	4.708	7.605	ab
B1.D2	5.75725	0.665037	4	5.060	6.387	ab
B1.D3	5.06433	0.904365	3	4.138	5.945	bc
B2.D1	7.88075	0.987072	4	6.795	9.107	a
B2.D2	2.94375	0.768082	4	1.985	3.569	c
B2.D3	2.81500	0.953702	4	2.064	4.211	c

Para poder conocer un mejor panorama del estudio de los tratamientos evaluados, se realiza el análisis de manera independiente de los dos factores que forman los tratamientos establecidos.

b. Efecto factor Biochar - Análisis de varianza

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Biochar	2	6.27	3.133	0.856	0.438
Error	23	84.18	3.66		

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha= 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
3.65997	23	5.069615	37.73669

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	3	3.541666	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
B	5.3455	0.6364	4	4.697	5.906	a
B1	5.5870	0.9892	10	4.138	7.605	a
B2	4.5465	2.5965	12	1.985	9.107	a

c. Efecto factor Dosis - Análisis de varianza

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab
Dosis	3	42.85	14.283	6.602	0.00238
Error	22	47.59	2.163		

Nivel de significación 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.5 '.' 0.1 ' ' 1 **

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha= 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
2.163367	22	5.069615	29.01283

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.92039	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
D0	5.3455	0.6364	4	4.6970	5.906	ab
D1	7.0244	1.5499	7	4.7080	9.107	a
D2	4.3505	1.6444	8	1.9850	6.387	b
D3	3.779	1.4741	7	2.064	5.945	b

Anexo 8: Prueba estadística para los datos obtenidos de la producción de materia seca foliar en la primera campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la producción de materia seca en las hojas de las plantas de maíz en la primera campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Tratamientos	6	2692	448.7	12.66	0.000027	***
Error	16	567	35.4			
Nivel de significación		0	0.001	0.01	0.5	1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos, por ende, se recurre al análisis de comparación de medias de Tukey.

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
35.4396	16	53.78335	11.0687

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Tratamientos	7	4.740611	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
BD0	44.50100	4.919297	4	40.643	51.237	b
B1.D1	49.23925	7.535391	4	41.770	58.116	b
B1.D2	58.07067	7.938970	3	52.458	67.154	b
B1.D3	43.61700	2.360609	3	41.727	46.263	b
B2.D1	78.92367	7.859746	3	72.644	87.738	a
B2.D2	52.74133	4.155974	3	48.163	56.276	b
B2.D3	53.99933	3.794324	3	49.846	57.284	b

Para poder conocer un mejor panorama del estudio de los tratamientos evaluados, se realiza el análisis de manera independiente de los dos factores que forman los tratamientos establecidos.

b. Efecto factor Biochar - Análisis de varianza

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab							
Biochar	2	1064	532	4.848	0.0192							
Error	20	2195	109.7									
Nivel de significación		0	'****'	0.001	'**'	0.01	'*'	0.5	'.'	0.1	' '	1

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha= 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
109.7448	20	53.78335	19.47799

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	3	3.577935	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
B	44.501	4.9193	4	51.237	51.2365	a
B1	50.2020	8.3472	10	67.154	67.154	ab
B2	61.8881	13.6712	9	87.738	87.738	b

c. Efecto factor Dosis - Análisis de varianza

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab							
Dosis	3	893.7	297.9	2.454	0.0929							
Error	20	2427.6	121.4									
Nivel de significación		0	'****'	0.001	'**'	0.01	'*'	0.5	'.'	0.1	' '	1

Análisis de comparación de medias de Tukey ($\alpha= 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
121.3797	20	54.11929	20.35734

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.958293	0.05

	MS	std	r	Min	Max	groups
D0	44.5010	4.9193	4	40.6430	51.2365	a
D1	61.9611	17.3420	7	41.7700	87.7380	a
D2	55.4060	6.3750	6	48.1630	67.1540	a
D3	50.6707	7.6084	7	41.7270	61.8460	a

Anexo 9: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio radicular en la primera campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la primera campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab							
Dosis	3	2.5357	0.8452	14.729	0.0000176	***						
Biochar	1	0.4156	0.4156	7.243	0.0133	*						
Dosis x Biochar	3	0.6907	0.2302	4.012	0.0203	*						
Error	22	1.2625	0.0574									
Nivel de significación		0	***	0.001	**	0.01	*	0.5	'	0.1	'	1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre los factores y la interacción, por ende, se recurre al análisis de efectos simples y de comparación de medias de Tukey.

b. Análisis de efectos simples y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
0.05738598	22	0.7706667	31.08396

Efecto simple factor Biochar

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.932899	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1	0.89	0.4073366	14	0.38	1.8	a
B2	0.66625	0.3978086	16	0.1	1.31	b

Efecto simple factor Dosis

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.927039	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
D0	1.234286	0.3420457	7	0.89	1.8	a
D1	0.842500	0.2985082	8	0.5	1.31	b
D2	0.547500	0.3046661	8	0.1	0.96	bc
D3	0.480000	0.2560599	7	0.26	0.99	c

Prueba de Tukey – interacción

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	relacion	8	4.72167	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1.D0	1.5000000	0.3675595	3	1.09	1.8	a
B1.D1	0.7150000	0.2055075	4	0.53	0.99	ab
B1.D2	0.7825000	0.2007278	4	0.58	0.96	ab
B1.D3	0.6566667	0.3089229	3	0.38	0.99	bc
B2.D0	1.0350000	0.1427118	4	0.89	1.23	bc
B2.D1	0.9700000	0.3497618	4	0.5	1.31	c
B2.D2	0.3125000	0.1703673	4	0.1	0.46	c
B2.D3	0.3475000	0.1135415	4	0.26	0.51	c

Anexo 10: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio foliar en la primera campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la primera campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

	Dosis1	Dosis2	Dosis3	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)								
B1	-0.024167	-0.024167	0.03	3	0.010688	1.2366	0.4432								
B2	-0.065833	0.017500	-0.03	3	0.013743	1.5901	0.4432								
Residuals				21	0.060500										
Nivel de significación				0	****	0.001	***	0.01	*	0.5	!	0.1	'	'	1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas solo entre el factor biochar, por ende, se recurre al análisis de efectos principales.

b. Análisis de efectos principales

	Value	Df	Sum of Sq	F	Pr(>F)										
D0	0.086667	1	0.011267	3.9107	0.18375										
D1	-0.016667	1	0.000476	0.1653	0.68845										
D2	0.105000	1	0.022050	7.6537	0.04626										
D3	0.045000	1	0.004050	1.4058	0.49800										
Residuals		21	0.060500												
Nivel de significación				0	****	0.001	***	0.01	*	0.5	!	0.1	'	'	1

Del análisis se tiene que solo existen diferencias significativas por el efecto de utilizar los dos tipos de biochar cuando se mantiene constante la dosis 2. Aun así, también se realizó el análisis de efectos simples para poder conocer el comportamiento individual.

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab										
Dosis	3	0.00884	0.002945	1.022	0.4027										
Biochar	1	0.02234	0.022337	7.753	0.0111										
Dosis x Biochar	3	0.01551	0.005169	1.794	0.1792										
Error	21	0.0605	0.002881												
Nivel de significación				0	****	0.001	***	0.01	*	0.5	!	0.1	'	'	1

Efecto simple factor Biochar

MSerror	Df	Mean	CV
0.00314561	27	0.3827586	14.65303

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.901727	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1	0.4114286	0.05613954	14	0.35	0.54	a
B2	0.356	0.0560357	15	0.23	0.45	b

Efecto simple factor Dosis

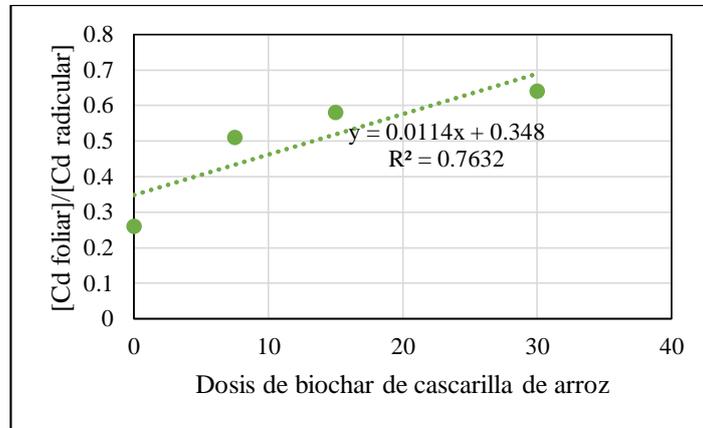
MSerror	Df	Mean	CV
0.0039337	25	0.3827586	1.638613

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.889997	0.05

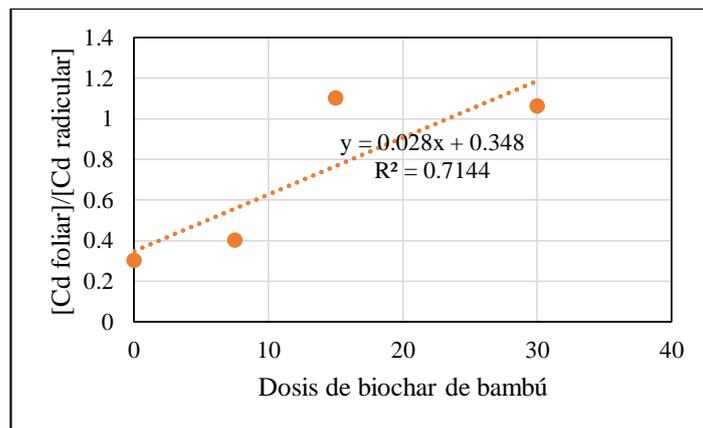
	Cd	Std	r	Min	Max	groups
D0	0.3500000	0.07509993	6	0.23	0.44	a
D1	0.3828571	0.04070802	7	0.33	0.45	a
D2	0.3950000	0.07270292	8	0.30	0.54	a
D3	0.3950000	0.05756983	8	0.30	0.51	a

Anexo 11: Análisis de regresión lineal entre la concentración de cadmio foliar y la concentración de cadmio radicular y su relación con la dosis de biochar aplicado

a. Análisis de regresión lineal con el biochar de cascarilla de arroz



b. Análisis de regresión lineal con el biochar de bambú:



Anexo 12: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio radicular en la segunda campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la concentración de cadmio en la raíz de las plantas de maíz en la segunda campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Dosis	3	0.9435	0.3145	14.005	0.0000253	***
Biochar	1	0.0351	0.03511	1.564	0.22428	
Dosis x Biochar	3	0.3596	0.11988	5.338	0.00646	**
Error	22	0.494	0.02246			
Nivel de significación		0	****	0.001	***	0.01
				*	0.5	'
					0.1	'
						1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre el factor dosis y la interacción, por ende, se recurre al análisis de efectos simples y de comparación de medias de Tukey.

b. Análisis de efectos simples y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
0.02245644	22	0.8336667	17.97538

Efecto simple factor Biochar

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.932899	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1	0.8075000	0.2664207	16	0.38	1.28	a
B2	0.8635714	0.2392491	14	0.53	1.23	a

Efecto simple factor Dosis

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.927039	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
D0	0.585	0.1461897	8	0.38	0.83	a
D1	0.7871429	0.1025856	7	0.65	0.93	ab
D2	0.92125	0.2278745	8	0.53	1.2	bc
D3	1.0642857	0.2282438	7	0.7	1.28	c

Prueba de Tukey – interacción

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	relacion	8	4.72167	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1.D0	0.5150000	0.11958261	4	0.38	0.63	d
B1.D1	0.8150000	0.08346656	4	0.73	0.93	abcd
B1.D2	0.7400000	0.14306176	4	0.53	0.85	cd
B1.D3	1.1600000	0.16512621	4	0.93	1.28	a
B2.D0	0.6550000	0.15000000	4	0.53	0.83	cd
B2.D1	0.7500000	0.13228757	3	0.65	0.9	bcd
B2.D2	1.1025000	0.11441882	4	0.95	1.2	ab
B2.D3	0.9366667	0.26950572	3	0.7	1.23	abc

Anexo 13: Prueba estadística para los datos obtenidos de la concentración de cadmio foliar en la segunda campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la concentración de cadmio en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Dosis	3	0.15399	0.05133	13.194	0.0000461	***
Biochar	1	0.00784	0.00784	2.016	0.17	
Dosis x Biochar	3	0.30388	0.10129	26.036	2.85E-07	***
Error	21	0.0817	0.00389			
Nivel de significación		0 '***'	0.001 '***'	0.01 '*'	0.5 '.'	0.1 ''

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre el factor dosis y la interacción, por ende, se recurre al análisis de efectos simples y de comparación de medias de Tukey.

b. Análisis de efectos simples y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
0.003890476	21	0.2317241	26.91721

Efecto simple factor Biochar

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.941018	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1	0.2500000	0.18584526	14	0.1	0.63	a
B2	0.2146667	0.07989875	15	0.1	0.38	a

Efecto simple factor Dosis

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.941878	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
D0	0.1625000	0.03918819	8	0.1	0.23	a
D1	0.2325000	0.10846329	8	0.1	0.38	a
D2	0.1957143	0.05912054	7	0.1	0.28	a
D3	0.3650000	0.23636836	6	0.1	0.63	b

Prueba de Tukey – interacción

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	relacion	8	4.743477	0.05

	Cd	std	r	Min	Max	groups
B1.D0	0.140	0.03366502	4	0.1	0.18	c
B1.D1	0.150	0.07071068	4	0.1	0.25	c
B1.D2	0.210	0.06557439	3	0.15	0.28	bc
B1.D3	0.570	0.10392305	3	0.45	0.63	a
B2.D0	0.185	0.03316625	4	0.15	0.23	bc
B2.D1	0.315	0.06557439	4	0.23	0.38	b
B2.D2	0.185	0.06137318	4	0.1	0.23	bc
B2.D3	0.160	0.05291503	3	0.1	0.2	bc

Anexo 14: Prueba estadística para los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno foliar en la primera campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la primera campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Dosis	3	481607	160536	2.849	0.0608	
Biochar	1	341580	341580	6.062	0.0221	*
Dosis x Biochar	3	727679	242560	4.305	0.0156	*
Error	22	1239648	56348			
Nivel de significación		0 ****	0.001 ***	0.01 **	0.5 '	0.1 ' ' 1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre los dos factores y la interacción, por ende, se recurre al análisis de efectos simples y de comparación de medias de Tukey.

b. Análisis de efectos simples y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSError	Df	Mean	CV
56347.65	22	900.5909	26.35787

Efecto simple factor Biochar

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.932899	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
B1	801.7361	219.6547	16	514.6064	1,152.104	a
B2	1,013.5678	364.9807	14	481.1856	1,907.795	b

Efecto simple factor Dosis

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.927039	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
D0	718.5731	204.1470	8	545.3997	1,148.988	a
D1	1,062.9023	451.7239	8	514.6064	1,907.795	ab
D2	928.8140	207.5423	7	603.9051	1,166.039	ab
D3	894.8894	234.6454	7	481.1856	1,152.104	b

Prueba de Tukey – interacción

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	relacion	8	4.72167	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
B1.D0	612.9470	61.89438	4	545.3997	679.5320	b
B1.D1	718.8626	177.08112	4	514.6064	944.4736	b
B1.D2	921.1866	245.32490	4	603.9051	1,128.1872	ab
B1.D3	953.9484	198.17393	4	701.0136	1,152.1037	ab
B2.D0	824.1992	252.31213	4	582.9320	1,148.9878	b
B2.D1	1,406.9420	359.35209	4	1,118.7176	1,907.7946	a
B2.D2	938.9839	196.65562	3	822.6240	1,166.0387	ab
B2.D3	816.1442	299.98153	3	481.1856	1,060.4980	b

Anexo 15: Prueba estadística para los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno foliar en la segunda campaña

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett, presentando un $p > 0.05$, se determina que los datos obtenidos siguen una distribución normal y existe homogeneidad de varianzas.

a. Análisis de varianza de los datos obtenidos de la absorción de nitrógeno en las hojas de las plantas de maíz en la segunda campaña, por efecto de la aplicación de dos tipos de biochar a cuatro dosis

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fcal	Ftab	
Dosis	3	681392	227131	15,438	1,56E-05	***
Biochar	1	27303	27303	1,856	0,1876	
Dosis x Biochar	3	189819	63273	4,301	0,0163	*
Error	21	308971	14713			
Nivel de significación		0	****	0.001	***	0.01
				*	0.5	' 0.1 ' ' 1

De acuerdo con el análisis de varianza se observa que existen diferencias significativas entre el factor dosis y la interacción, por ende, se recurre al análisis de efectos simples y de comparación de medias de Tukey.

b. Análisis de efectos simples y comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$)

MSerror	Df	Mean	CV
14712.92	21	897.4899	13.51512

Efecto simple factor Biochar

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Biochar	2	2.941018	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
B1	873.1546	171.4554	15	623.8484	1,208.950	a
B2	923.5634	244.5606	14	565.3217	1,295.335	a

Efecto simple factor Dosis

Test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Dosis	4	3.941878	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
D0	897.3564	160.0886	7	710.5252	1,130.414	b
D1	1,115.8412	137.5076	8	913.1878	1,295.335	a
D2	849.4348	152.0535	7	623.8484	1,072.179	bc
D3	696.1342	129.8997	7	565.3217	897.582	c

Prueba de Tukey – interacción

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Relacion	8	4.743477	0.05

	mgN	std	r	Min	Max	groups
B1.D0	788.3042	57.14962	4	710.5252	831.6484	cd
B1.D1	1,094.7444	118.52892	4	928.8412	1,208.9504	ab
B1.D2	785.8424	142.54818	4	623.8484	925.9740	cd
B1.D3	807.2518	122.31525	3	668.0582	897.5820	bcd
B2.D0	1,042.7593	128.40648	3	895.3669	1,130.4140	abc
B2.D1	1,136.9380	169.95140	4	913.1878	1,295.3354	a
B2.D2	934.2248	141.45271	3	789.5154	1,072.1780	abc
B2.D3	612.7960	46.54457	4	565.3217	675.8010	d

Anexo 16: Fotos del ensayo

- a. Parcela en campo dentro de la UNALM de donde se obtuvo la muestra de suelos para realizar la investigación



- b. Horno especial en el cual se realizaron los procesos de pirólisis de los dos tipos de biochar, controlando las temperaturas y salidas de subproductos



c. Cascarilla de arroz y trozos de bambú luego de la pirólisis



d. Preparación del sustrato a utilizar: suelo muestreado y dos tipos de biochar aplicados a cuatro dosis, manejando cuatro repeticiones



- e. Manejo agronómico de las plantas de maíz sembradas en el sustrato (suelo + biochar) en macetas



f. Cosecha, molienda y preparado de las muestras radiculares y foliares de las plantas de maíz para los análisis en laboratorio



g. Análisis en laboratorio: digestión seca para la obtención de alícuota para analizar cadmio mediante espectrofotometría de absorción atómica



h. Análisis en laboratorio: método de Kjeldahl para análisis de nitrógeno

