

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFFECTOS DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE *Oriza sativa* (Arroz) SOBRE
Daphnia magna (Pulga de agua) y *Lactuca sativa* (Lechuga), EN FASE DE
LABORATORIO, LIMA - PERÚ**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

MAURA ERICKA CHUQUIYAURI SOLANO

Asesores

Ing. Mg. VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO

Mg. Quím. MARY FLOR CÉSARE CORAL

Tingo María – Perú

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 23 de Diciembre del 2021 a hora 8:05 a. m. a través de la Sala Virtual de Conferencias Microsoft Teams de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“EFECTO EL BIOCHAR DE CASCARILLA DE *Oriza sativa* (Arroz) SOBRE *Daphia magna* (Pulga de agua) y *Lactua sativa* (Lechuga), EN FASE DE LABORATORIO, LIMA - PERÚ”

Presentado por la Bachiller: **CHUQUIYAURI SOLANO, Maura Ericka**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **Ingeniero Ambiental**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 09 de Diciembre de 2021

Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. MSc. JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR
MIEMBRO DEL JURADO

Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
MIEMBRO DEL JURADO

Ing. MSc. VICTOR M. BETETA ALVARADO
ASESOR DE LA TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EFFECTOS DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE *Oriza sativa* (Arroz) SOBRE *Daphnia magna* (Pulga de agua) y *Lactuca sativa* (Lechuga), EN FASE DE LABORATORIO, LIMA - PERÚ

Autor	: Chuquiyauri Solano, Maura Ericka.
Asesores	: Ing. Mg. Beteta Alvarado, Víctor Manuel. : Mg. Quím. Césare Coral, Mary Flor.
Programa de investigación	: Niveles de contaminación ambiental.
Línea(s) de investigación	: Ciencia y Tecnología ambientales.
Eje temático de investigación	: Contaminación de agua.
Lugar de ejecución	: Laboratorio de tesis - UNALM
Duración	: Inicio: 03 de setiembre del 2019. : Termino: 03 de marzo del 2020.
Financiamiento	: Propio.
Monto	: S/ 3165.80

Tingo María – Perú

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza, sabiduría y entereza para enfrentar los obstáculos que se presenten y ayudarme a seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mi mamá Susana Solano y a mi mamita Lidia Santa María, quienes, con mucho amor y sacrificio, me brindaron apoyo moral y económico para lograr uno de mis objetivos y acompañarme durante mi vida profesional.

A mi hermanita Anghely por ser mi inspiración, a mí tío Jack, y a mi papá Abel, por haber Confiado en mí y brindarme el apoyo moral durante mi vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

- A mi querida familia, por ser el soporte emocional de mi vida.
- A mi alma mater, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por la formación académica.
- A mi mentor, el Ing. Mg. Víctor Beteta Alvarado, asesor de mi tesis, a la Mg. Quim. Mary Flor Césare Coral, co asesora de mi tesis, por el apoyo, confianza y experiencia para la culminación de esta tesis.
- A los miembros de mi jurado de tesis; a la Dr. Ore Cierito, al Ing. MSc. Franklin Dionisio y al Ing. José Luis Paredes, por su comprensión, presteza y apoyo.
- A todas aquellas personas que directa o indirectamente me apoyaron en el avance, desarrollo y culminación de esta tesis.
- Al Dpto de Química de la Universidad Nacional Agraria la Molina por haberme alojado en sus instalaciones y hacer realidad este trabajo de investigación.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Nacionales.....	3
2.1.2. Internacionales.....	4
2.2. <i>Oryza sativa</i> (arroz)	5
2.2.1. El cultivo de arroz en la amazonia peruana	5
2.3. Biochar.....	6
2.3.1. Materia prima del biochar	6
2.3.2. Estructura química	7
2.3.3. Composición	8
2.4. Características del biochar	8
2.4.1. Propiedades físicos y químicos del biochar	10
2.4.2. Análisis próximo del biochar	11
2.5. Pirólisis	13
2.5.1. Proceso de la pirolisis	15
2.6. Rendimiento.....	18
2.6.1. Toxicidad	18
2.6.2. Parámetros toxicológicos	20

2.7.	Extracto del biochar	21
2.8.	Bioensayos toxicológicos.....	22
2.8.1.	Tipos de ensayos toxicológicos	22
2.8.2.	Bioensayos con <i>Lactuca sativa</i>	23
2.8.3.	<i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>acephala</i> Dill	24
2.8.4.	Semilla y germinación	25
2.8.5.	<i>Daphnia magna</i>	26
2.8.6.	Principio de la prueba	27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1.	Ubicación política y geográfica	29
3.1.1.	Ubicación política	29
3.1.2.	Ubicación geográfica.....	29
3.2.	Aspectos ambientales	29
3.3.	Materiales y métodos	31
3.3.1.	Materiales	31
3.3.2.	Reactivos	31
3.3.3.	Equipos.....	31
3.3.4.	Organismo de prueba.....	31
3.3.5.	Software	31
3.4.	Tipo de investigación	32
3.4.1.	Variables de investigación.....	32

3.4.2.	Unidad experimental.....	32
3.4.3.	Diseño experimental.....	32
3.5.	Metodología.....	33
3.5.1.	Acondicionamiento de la materia prima y obtención del biochar de cascarilla de arroz	33
3.5.2.	Caracterización del biochar de cascarilla de arroz.....	37
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Obtención de biochar de la cascarilla de <i>Oriza sativa</i> (arroz) y su rendimiento de producción a escala de laboratorio	41
4.2.	Caracterización del biochar obtenido a partir de la cascarilla de <i>Oryza sativa</i> (arroz) a nivel de laboratorio	43
4.2.1.	Análisis físico	43
4.2.2.	Análisis químico elemental.....	47
4.2.3.	Análisis termo gravimétrico.....	50
4.2.4.	Poder Calórico.....	55
4.2.5.	Análisis lignocelulósico	56
4.3.	Determinar el nivel de toxicidad del biochar obtenido a partir de la cascarilla de <i>Oryza sativa</i> (arroz) en <i>Daphnia magna</i> (pulga de agua) y <i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	58
4.3.1.	Bioensayos de la toxicidad de biochar de la cascarilla de <i>Oryza sativa</i> (arroz) en <i>Daphnia magna</i> (pulga de agua)	58
4.3.1.	Bioensayos de la toxicidad de biochar de la cascarilla de <i>Oryza sativa</i> (arroz) en <i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	60
V.	CONCLUSIONES	63

VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	64
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
1. Cantidad de productos obtenidos en función de la tecnología pirolítica utilizada según Laguarda (2012).	14
2. Componentes de la biomasa lignocelulósica y sus rangos de descomposición térmica.	15
3. Parámetros de caracterización del biochar de cascarilla de arroz.	37
4. Rendimiento del biochar de la cascarilla de arroz obtenidos a 600 °C y 900 °C.	41
5. Análisis físico del biochar de la cascarilla de arroz obtenido a diferentes temperaturas.	43
6. Análisis químico elemental de la cascarilla de arroz.	47
7. Análisis Termo gravimétrico – TGA (Proximal) de la cascarilla de arroz.	50
8. Análisis de Poder Calórico (Calorímetro) de la cascarilla de arroz.	55
9. Análisis lignocelulósico de la cascarilla de arroz.	56
10. Nivel de toxicidad del biochar obtenido a 600° C y 900 °C, en <i>Daphnia magna</i> (pulga de agua).	58
11. Determinación del LC50 del Biochar.	58
12. Índice de elongación promedio de semillas de <i>Lactuca sativa</i> a concentraciones de solución de biochar.	60
13. Nivel de toxicidad del biochar a 900°C probado en <i>Daphnia magna</i> probado en solución de diferentes porcentajes de concentración.	73
14. Control de pruebas en semillas de lechuga con biochar de 600° C.	78
15. Control de pruebas en semillas de lechuga con biochar de 900° C.	83
16. Crecimiento de semillas de <i>Lactuca sativa</i> (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 600° C.	84
17. Diferencia de elongación de <i>Lactuca sativa</i> (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 600° C.	84

18. Crecimiento de semillas de <i>Lactuca sativa</i> (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 900° C.	85
19. Diferencia de elongación de <i>Lactuca sativa</i> (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 900° C.	86
20. Cálculos del método Probit para biochars de 900°C y 600°C.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
1. Sistematización del proceso de pirolisis.....	13
2. Pirolisis de la hemicelulosa.	16
3. Pirolisis de la celulosa.	17
4. Pirolisis de la lignina.	17
5. Etapas del proceso de germinación de una semilla de lechuga.	26
6. Flujograma para la obtención del Biochar	34
7. Temperatura versus rendimiento del biochar.	41
8. Variación del Ph (T° 22) a 600°C y 900°C de la cascarilla de arroz.	44
9. Variación de la C.E. (uS/cm) a 600 °C y 900 °C de la cascarilla de arroz.....	45
10. Variación de la densidad aparente (Kg/L) a 600 °C y 900 °C de la cascarilla de arroz.....	46
11. Variación del porcentaje de carbono a 600 °C y 900 °C.....	48
12. Variación del porcentaje de nitrógeno a 600 °C y 900 °C.	49
13. Variación del porcentaje de relación carbono/nitrógeno a 600 °C y 900 °C.....	50
14. Variación del análisis termo gravimétrico a 600°C y 900°C.	51
15. Variación del porcentaje de humedad a 600 °C y 900 °C.	52
16. Variación del porcentaje de material volátil a 600 °C y 900 °C.	53
17. Variación del porcentaje de ceniza a 600 °C y 900 °C.	54
18. Porcentaje de muerte de <i>Daphnia</i> vs porcentaje de concentración de biochar de 600°C.....	59
19. Porcentaje de muerte de <i>Daphnia magna</i> vs porcentaje de biochar de 900°C.....	59
20. Elongación promedio vs concentraciones de solución de biochar.	61

RESUMEN

En este estudio se investigó el impacto del biochar producido a 600°C y 900°C a partir de cáscaras de *Oryza sativa* (arroz) sobre *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga). Fueron caracterizados para conocer su composición físico químico, lignocelulósico y su rendimiento. Para las pruebas de toxicidad se preparó el extracto del biochar concentrado al 100%, de acuerdo al método Zucconi, a partir del cual se prepararon soluciones a las concentraciones de 6,25%; 12,5%; 25%; 50%; 75% y 100%. Posteriormente se utilizó el método de probit para determinar el valor LC50, y los factores LOAEL y el NOAEL. Los resultados fueron que utilizando biochar de 900°C en una solución al 48,5 % y biochar de 600°C en una solución al 212 %, podían matar el 50 % de las *Daphnia magna*. El valor LOAEL indica que con la solución al 50% de biochar de 600°C, muere 14% de *Daphnia magna*, mientras que para el biochar de 900°C, muere 86% de *Daphnia magna*. Para los valores de NOAEL, se observó que con el extracto al 25% con biochar de 600°C, muere el 4% de *Daphnia magna*, y biochar de 900°C se produce la muerte del 10% de *Daphnia magna*. La elongación de la *Lactuca sativa*, es creciente hasta la concentración de 12,5% con el biochar obtenido a 600°C y hasta la concentración de 6,25% con el biochar de 900°C, Finalmente se concluye que el extracto de biochar obtenido a 600°C tiene un efecto menos tóxico sobre el medio aplicado.

Palabras clave: Método Zucconi, método probit, LOAEL, NOAEL, LC50.

ABSTRACT

This study investigated the impact of biochar produced at 600°C and 900°C from *Oryza sativa* (rice) husks on *Daphnia magna* (water flea) and *Lactuca sativa* (lettuce). They were characterized to determine their physical-chemical and lignocellulosic composition and their yield. For the toxicity tests, the 100% concentrated biochar extract was prepared according to the Zucconi method, from which solutions were prepared at concentrations of 6.25%; 12.5%; 25%; 50%; 75% and 100%. Subsequently, the probit method was used to determine the LC50 value, and the LOAEL and NOAEL factors. The results were that using 900°C biochar in 48.5% solution and 600°C biochar in 212% solution could kill 50% of *Daphnia magna*. The LOAEL value indicates that with the 50% solution of 600°C biochar, 14% of *Daphnia magna* are killed, while for the 900°C biochar, 86% of *Daphnia magna* are killed. For the NOAEL values, it was observed that with the 25% extract with 600°C biochar, 4% of *Daphnia magna* died, and with 900°C biochar, 10% of *Daphnia magna* died. The elongation of *Lactuca sativa* increased up to a concentration of 12.5% with biochar obtained at 600°C and up to a concentration of 6.25% with biochar at 900°C. Finally, it was concluded that the biochar extract obtained at 600°C has a less toxic effect on the applied medium.

Keywords: *Zucconi method, probit method, LOAEL, NOAEL, LC50.*

I. INTRODUCCIÓN

Las malas condiciones naturales de los suelos y/o la mala gestión de los mismos repercuten negativamente en la producción agrícola de muchas zonas del país, especialmente en el centro del país. La falta o pérdida de fitonutrientes es un problema particular, y esto es especialmente cierto para los suelos de la Amazonía peruana, donde son particularmente deficientes. Esto se debe a que se trata de suelos ácidos muy erosionados y con poca capacidad de retención de iones catiónicos (como el calcio, el magnesio y el potasio, entre otros minerales), así como al hecho de que la materia orgánica y el contenido de nitrógeno están agotados.

Ante esta situación, se ofrece una solución: la creación de biochar, que ha demostrado ser útil para el suelo y el agua, así como para potenciar la fertilidad a través de sus efectos sobre los aspectos físicos, químicos y biológicos del suelo.

Para la mayoría de interacciones del biochar y el tratamiento del suelo, la base de evidencia científica actualmente es insuficiente para llegar a un consenso. Pero lo que es obvio es que la aplicación de biochar a los suelos tendrá un impacto en las características y procesos del suelo y, como resultado, interactuará con los problemas existentes y potenciales del suelo. El conocimiento de estas interacciones y los mecanismos subyacentes, son necesarios para realizar los estudios necesarios para comprender los mecanismos e impactos de las amenazas a los suelos y ecosistemas en su conjunto.

En este estudio, los autores presentan una caracterización detallada de los biochar producidos bajo dos condiciones de temperaturas de pirólisis lenta (600 °C y 900°C) utilizando la biomasa residual de pilas de *Oryza sativa* (arroz) del departamento de San Martín, y luego realizan un ensayo toxicológico para determinar el crecimiento de la *Lactuca sativa* (lechuga) y la mortalidad de *Daphnia magna* (pulga de agua).

Por lo tanto, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuáles son los efectos del biochar de cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) sobre *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga), en fase de laboratorio, Lima – Perú?; así mismo se formuló la hipótesis siguiente: el efecto del extracto biochar de la cascarilla de *O. sativa* (arroz) obtenido mediante la incineración de 600 °C será menos tóxico que el extracto de biochar obtenido a 900 °C.

Objetivo general

- Evaluar los efectos del biochar de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) sobre *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga), en fase de laboratorio, Lima – Perú.

Objetivos específicos

- Obtener biochar a partir de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) y determinar su rendimiento de producción a escala de laboratorio.
- Caracterizar el biochar obtenido a partir de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) a nivel de laboratorio.
- Determinar el nivel de toxicidad del biochar obtenido a partir de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) en *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Nacionales

Trujillo et al. (2019) desarrollaron una investigación denominada “Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas” con el objetivo de demostrar que los sistemas avícolas intensivos generan residuos orgánicos (pollinaza y gallinaza), los cuales, al ser utilizados en fresco, tienen consecuencias ambientales negativas; sin embargo, estos residuos orgánicos son ricos en nutrientes que pueden ser utilizados como enmiendas del suelo, por lo que la producción de biochar es un método alternativo para su uso. La fabricación de biochar se llevó a cabo en este estudio utilizando un horno de pirólisis, de acuerdo con los resultados (5 kg de capacidad). Durante el proceso de fabricación se midieron las siguientes características: temperatura, rendimiento y densidad del material producido. Además, se caracterizaron las materias primas (estiércol de pollo y gallinaza) y el biochar producido, determinándose los siguientes parámetros: pH, humedad, cenizas, carbono orgánico total, así como los contenidos de macro y micronutrientes. Al comparar el rendimiento, la densidad, el pH, la humedad, las cenizas, el nitrógeno, el fósforo total, el calcio, el magnesio y el hierro de la gallinaza y el estiércol de pollo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento, la densidad, el pH, la humedad, las cenizas, el nitrógeno, el calcio, el magnesio y el hierro. El biochar se sometió a pruebas de bioensayo para evaluar la tasa de desarrollo de la semilla y la tasa de crecimiento del tallo en los primeros diez días tras su aplicación. El tratamiento del 3% aumentó significativamente la tasa de germinación del biochar de gallinaza y, como resultado, también aumentó significativamente la longitud del desarrollo del tallo de las plántulas.

Guerra (2015) realizó un estudio titulado "Producción y caracterización de biochar a partir de biomasa residual de sistemas agroforestales y agricultura convencional en la Amazonía peruana", cuyo objetivo fue evaluar las principales características físicas y químicas del biochar producido por pirólisis lenta a temperaturas que oscilan entre 550 y 600°C y a partir de ocho tipos diferentes de materias primas residuales derivadas de cultivos agroforestales y de cultivos de manejo tradicional de la Amazonía peruana. Para la fabricación de biochar se empleó la

biomasa residual de cultivos agroforestales como *Theobroma cacao* (cacao), *Elaeis guineensis* (palma aceitera) y *Bactris gasipaes* (palma de pijuayo), así como de cultivos de manejo convencional como *Plukenetia volubilis* Linnaeus (sacha inchi) y *Oryza sativa* (arroz). En la caracterización se siguieron los criterios de las normas mundiales ASTM, el TMECC del Consejo de Compostaje de Estados Unidos y la metodología presentada en el estudio consultado. Finalmente, se descubrió que había cambios estadísticamente significativos en todas las características investigadas del biochar en función de la materia prima utilizada. Se encontró que el biochar hecho a partir de cáscara de sacha inchi y corteza interna de palmito era el más adecuado para su uso como enmienda del suelo en este estudio. Además, el biochar fabricado con cáscara de sacha inchi y raquis de hoja de palmito resultó ser el agente potencial de secuestro de carbono más eficaz en comparación con otras opciones.

2.1.2. Internacionales

Los gases de combustión de la cascarilla de arroz fueron capturados y convertidos en carbonato de calcio (CaCO_3) por Prada *et al.* (2010), quienes publicaron un artículo científico titulado "Thermal Decomposition of Rice Husks: An Alternative for Integral Utilization" con el objetivo de convertir los gases de combustión de la cascarilla de arroz en carbonato de calcio (CaCO_3), útil en las labores agrícolas. Se utilizaron soluciones acuosas de KOH y NaOH para demostrar que los gases de combustión de la cáscara de arroz pueden recogerse y convertirse en CaCO_3 mediante la adición de CaCl_2 a la solución acuosa. Se midieron las características del proceso de combustión (como la masa de cáscara, la temperatura y la masa de cenizas), las características del proceso de captación de gases (como el tiempo de reacción, el pH y la $T^\circ\text{C}$), las características del proceso de precipitación de CaCO_3 (como la masa de CaCl_2 necesaria) y la masa de CaCO_3 obtenida.

Los investigadores de las universidades de Canadá, California, la República Popular China e Ibagué (Colombia) realizaron un análisis comparativo de las principales características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz, que utilizaron como punto de partida para el proyecto de conversión de la biomasa del arroz en energía eléctrica y térmica. Los resultados de su investigación se publicaron en la revista científica Valverde *et al.* (2007), "Comparative analysis of the physicochemical characteristics of rice husks". Donde existe una igualdad entre los rangos de características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz para países tan distantes y

diferentes como China, Canadá, Estados Unidos y Colombia; y que las temperaturas de oxidación alcanzadas en estos países son del orden de 1200K, liberando aproximadamente el 67% del valor calórico en la etapa dominante de la combustión, que corresponde a la combustión de los volátiles.

2.2. *Oryza sativa* (arroz)

Según IIA (2001), *Oryza sativa* es una especie de planta de la familia Gramíneas con fruto comestible. Crece espontáneamente en el continente asiático y se cultiva desde aproximadamente 5000 a. c. Y eso es una parte integral de estas culturas. *O sativa* es el segundo cereal más grande en términos de producción en el mundo con 736,2 millones de toneladas (mt) en el 2012 tras el maíz (913 mt), el más importante en la dieta humana y fuente de una quinta parte de las calorías consumidas en el mundo (IIA, 2001).

Las subespecies son:

- *Oryza sativa* var. *amaura* (Alef.) Körn.
- *Oryza sativa* var. *atrobrunnea* (Gustchin) Portères.
- *Oryza sativa* var. *melanoglumella* (Gustchin) Portères.
- *Oryza sativa* var. *mulayana* (Gustchin) Portères.
- *Oryza sativa* var. *mutica* (Vavilov) Portères.
- *Oryza sativa* var. *rubriglumella* (Gustchin) Portères.

2.2.1. El cultivo de arroz en la amazonia peruana

Debido a las altas temperaturas que se registran durante todo el año en las regiones de San Martín y Yurimaguas, el arroz es un cultivo tropical que prospera en estas zonas. Dependiendo de la variedad, se puede sembrar y cosechar dos veces al año (13-14 toneladas/ha). Este cultivo es una alternativa viable al cultivo de la hoja de coca; sin embargo, algunos agricultores no respetan los métodos de conservación de las cuencas hidrográficas, contaminando y agotando las reservas locales de agua como resultado de sus acciones. Además, los cultivadores no reciben ninguna ayuda del gobierno y no disponen de estrategias de gestión de los residuos de los cultivos. Se ha demostrado que la cáscara de arroz contiene entre un 85%

y un 90% de silicio. En forma de ceniza, este mineral puede devolverse al suelo, o puede ponerse directamente en el suelo como enmienda.

2.3. Biochar

La palabra en inglés “biochar” es un término relativamente nuevo para productos porosos de grano fino que se asemejan al carbón vegetal (verheijen et al., 2009a).

En el sector agrícola hay que hacer frente a dos retos críticos. En este caso, uno es el bajo contenido de nutrientes del suelo, y otro la rápida mineralización de los materiales orgánicos (conversión del nitrógeno orgánico en amonio). (Zheng et al., 2010).

Debido al hallazgo de partículas similares al carbón en suelos muy fértiles y ricos en carbono de la Amazonia brasileña, conocidos localmente como Terra Preta, se ha popularizado la aplicación de biochar al suelo. (Abenza, 2012).

Según Lehmann (2009), el biochar se puede definir como un producto enriquecido de carbono a partir de biomasa. Se piroliza lentamente a temperaturas inferiores a 700 °C en entornos con poco oxígeno.

El biochar se diferencia del carbón vegetal principalmente en la gama de aplicaciones que se le atribuyen, por ejemplo, se emplea a propósito como enmienda del suelo para mejorar sus atributos físicos.

La International Biochar Initiative o IBI (2012) en su “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil”, Los materiales sólidos obtenidos de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno limitado de oxígeno se denominan biochar.

2.3.1. Materia prima del biochar

Según las "Directrices estandarizadas para la definición y ensayo de productos de biochar utilizados en el suelo" (IBI, 2015), la materia prima utilizada para la producción de biochar debe tener ciertas características, dado que el material de origen es el que determinará las propiedades que pueda adquirir el producto final, por lo que las características limitantes son las siguientes:

- La materia prima puede ser una combinación de biomasa y diluyentes, con un contenido de contaminantes no superior al 2%;

- Es necesario declarar como componente de la materia prima cualquier diluyente que tenga un peso seco de la materia prima superior al 10% e incluir en la declaración cualquier requisito para las discrepancias que se produzcan durante el procesamiento de los componentes.

- La materia prima puede dividirse en dos categorías: procesada y no procesada, y cada categoría requiere un nivel diferente de muestreo y análisis para determinar el potencial de toxicidad.

- Las materias primas cultivadas en suelos contaminados deben considerarse procesadas para cumplir los requisitos de evaluación de la toxicidad.

- Los residuos peligrosos no se incluirían en la lista de materiales que podrían utilizarse para producir biochar.

2.3.2. Estructura química

Según Schahczenski (2010), existen muchas similitudes en la composición química de los biochar y el carbón producido como combustible, que solo se distinguen por la finalidad para la que se procesan. Sin embargo, el carbón mineral, formados por procesos geológicos a lo largo del tiempo, en escalas geológicas, que también están disponibles como biomasa, tienen relaciones O/C más altas que el biochar (Major, 2011).

Se trata de una complicada red de procesos en los que los elementos primarios de la biomasa, como la celulosa, la fibra, la hemicelulosa y la lignina, se descomponen y se definen mediante diversos grados de reactividad, lo que se denomina pirólisis (Novak et al., 2009).

Hay dos componentes estructurales principales en cada partícula de biochar: un conjunto de hojas conectadas de grafeno cristalino y una estructura aromática amorfa organizada, ambos unidos por enlaces de carbono en forma de anillos de tipo benceno con átomos de oxígeno o hidrógeno (Lehmann y Joseph, 2009). La estabilidad del biochar está regulada por los enlaces entre las estructuras aromáticas C-O y C-H, que pueden medirse por

el grado de aromaticidad (Hammes et al., 2006). También contiene estructuras de carbono que son altamente degradables, como el carbono oxidado y alifático.

2.3.3. Composición

Se diferencia del grafito en que está organizado químicamente en la estructura 6 Carbonos y produce anillos aromáticos irregulares, mientras que el grafito tiene una estructura regular. Además, debido a su baja temperatura, no siempre tiene una estructura bien estructurada, lo que es una de las razones por las que varía del grafito. Además, dependiendo de la materia prima utilizada, puede incluir minerales específicos como el calcio y el magnesio (Lehmann et al., 2009).

Dado que son resistentes a la oxidación química y biológica, y que su tiempo de residencia en los suelos oscila entre cientos y miles de años, algunas investigaciones sugieren que los componentes del biochar son altamente recalcitrantes. Esto se debe a que tienen un tiempo de residencia que es entre decenas y miles de veces mayor que el tiempo de residencia de la mayoría de la materia orgánica del suelo (Lehmann y Joseph, 2009; Woolf et al., 2010; Shrestha et al., 2010; Major 2010). En virtud de su recalcitrancia, la adición de este producto al suelo tiene el potencial de operar como un potencial adsorbente de carbono, contribuyendo así a la disminución del exceso de CO₂ en la atmósfera (Verheijen et al., 2009a). Sin embargo, hay que destacar que no todo el biochar permanece sin modificar en el suelo, y que parte de él puede oxidarse (Cheng et al., 2008), lo que provoca una reducción de la calidad del suelo en general.

En términos de macronutrientes, el nitrógeno es el más sensible al calor, y como resultado, se prevé que la concentración de nitrógeno del biochar generado a altas temperaturas sea baja (Tyron, citado por Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012). Los estudios han demostrado que el bajo contenido de nitrógeno de la mayoría de las muestras de biochar puede atribuirse a la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco u óxidos de nitrógeno durante el proceso de carbonización (McLaughlin et al., 2009). En cambio, el carbono se volatiliza a unos 100 °C, el nitrógeno a unos 200 °C, el azufre a unos 375°C, y el potasio y el fósforo a unos 700-800 °C.

2.4. Características del biochar

Varios investigadores, entre ellos Brady y Weil, a los que hace referencia Oses (2012), creen que las características físicas del biochar contribuyen a su papel como herramienta de gestión medioambiental. Sus características físicas pueden estar relacionadas con la forma en

que influyen en el suelo, tanto de forma directa como indirecta. Cada tipo de suelo tiene un conjunto único de características físicas que están determinadas por la constitución mineral del suelo, la cantidad de materia orgánica presente y la forma en que la materia orgánica está conectada.

La adición de biochar al suelo tiene una influencia sustancial en las cualidades del sistema, como la profundidad, la textura y la estructura. También tiene un impacto en la porosidad y la textura al alterar la superficie aparente, el tamaño y la distribución de los poros y la densidad del sistema del suelo. Debido a la profunda penetración y disponibilidad de aire y agua dentro de la zona de las raíces, los efectos de la adición de biochar en los suelos pueden tener un impacto directo en el crecimiento de las plantas. Esto se debe principalmente a la penetración profunda e disponibilidad del aire y agua al interno de la zona de las raíces principalmente relacionados a las propiedades físicas del perfil de los suelos (Tumminelli, 2011).

El biochar proviene a partir de una amplia gama de biomasa con una gran variedad de composiciones químicas. El proceso de calentamiento es la base de la formación del biochar debido a la variedad de los compuestos que están presentes. Por ello, los investigadores Maienza *et al.* (2016) descubrieron que las características químicas y físicas del biochar son completamente dependientes del proceso de pirólisis, de manera que a medida que aumenta la temperatura, el rendimiento volumétrico del producto sólido (biochar) disminuye, y la producción de syngas aumenta, incrementando el suministro de energía. En efecto, la materia orgánica pierde hidrógeno, oxígeno y nitrógeno durante el proceso de pirólisis, dando lugar al biochar.

El biochar está formado por partículas de distintos tamaños, que varían en función del origen y el tamaño de la materia prima utilizada para fabricarlo (Lehmann, 2007). Estos microporos varían en tamaño de <2 nm, 2-50 nm y >50 nm, y su porosidad es grande, lo que lleva a algunos a compararlos con un "arrecife subterráneo", donde los microorganismos pueden habitar (Rouquerol *et al.*, 1999; Downie *et al.*, 2009). En la materia prima inicial se forman huecos que permiten el rápido tránsito de sorbatos para su difusión en el volumen de microporos, lo que facilita el movimiento de las moléculas concentradas (Martínez *et al.*, 2006). Dado que las partículas se forman durante la pirólisis, se vuelven más porosas (microporos) a

medida que aumenta la temperatura, da lugar a zonas de carga más reactivas en el producto final. La adsorción de sustancias líquidas, sólidas y gaseosas se ve facilitada por la presencia de microporos (Verheijen et al., 2009b). Tiene una densidad aparente relativamente baja, que oscila entre 0,30 y 0,43 g.cm⁻³, ya que es generado a partir de una variedad de materias primas diferentes en una variedad de hornos diferentes (Pastor et al., 1993). En general, tiene una alta área superficial, que oscila entre 200 y 400 m² g⁻¹ (Kishimoto y Sugiura, 1985).

El carbón biológico tiene una amplia gama de composiciones químicas. Es posible que el nitrógeno no se disponga en la biomasa inicial. Según Maek y Brownsort (2011), el fósforo suele quedar retenido durante la volatilización de las moléculas orgánicas enlazadas y está presente como ceniza dentro del biochar. Una vez solubilizado, el fósforo se hace accesible a las plantas por éstas.

2.4.1. Propiedades físicos y químicos del biochar

2.4.1.1. pH de la solución del biochar

Debido a que el pH es un determinante directo de los efectos de la relación suelo-biochar -planta, el pH final dependerá de la materia prima inicial y de las condiciones de acondicionamiento es que el pH es un factor crucial a considerar (Lehmann et al., 2011).

Como resultado de las investigaciones de caracterización del biochar, los investigadores han asignado reacciones en las que el pH va de ácido a alcalino, con un pH media de 8,1 y un rango de pH aceptable de 6,2 a 13. (Chang y Xu, 2009; Srinivasarao et al., 2013).

2.4.1.2. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio de cationes (CEC) de una superficie es muy variable y puede variar desde unas pocas unidades hasta 40 cmol kg⁻¹ dependiendo de la química superficial. Esta experimenta modificaciones tras su incorporación a los suelos como resultado de las interacciones con el medio ambiente circundante. Cuando se emplean temperaturas bajas en la pirólisis, se ha demostrado que la CIC puede ser bastante baja, pero que aumenta

drásticamente a temperaturas más altas (Lehmann, 2007), debido a que el pH aumenta con la temperatura.

2.4.1.3. Conductividad eléctrica o sólidos totales disueltos

La conductividad eléctrica del biochar es una medida de la cantidad total de sales disueltas presentes en la solución, que incluye todos los fertilizantes y sales neutras. Aunque no siempre es un problema, el exceso de sal puede tener un impacto perjudicial en la mayoría de las plantas. La presencia de un alto contenido de cenizas en el biochar incrementa la probabilidad de que éste aumente los Sólidos Totales Disueltos, ya que las sales solubles se evalúan en forma de cenizas. (Lehmann, 2007).

2.4.2. Análisis próximo del biochar

Es necesario determinar las siguientes características del biochar: humedad, cenizas (sílice, hierro, alúmina y materia incombustible), materia volátil o móvil, materia residente o recalitrante (carbono fijo), que corresponde al sólido que queda después de la expulsión de la materia volátil, pero que no está compuesto totalmente de carbono (McLaughlin et al., 2009).

2.4.2.1. Contenido de humedad

Utilizando cálculos teóricos, el contenido de humedad del biochar se define como la cantidad de masa de agua perdida tras el secado de la muestra, asumiendo que el agua es el único volátil presente a temperaturas superiores a los 105 °C. Según McLaughlin (2010), indica que además de vapor, puede liberar disolventes orgánicos de bajo punto de ebullición (y -105 °C) que pueden reconocerse por sus olores, como el metanol y el ácido acético, que se detectan fácilmente.

Los estudios han demostrado que el biochar, como el carbón activado, es un material higroscópico para esto se debe a su excelente capacidad para absorber la humedad del ambiente en que se encuentra el biochar. Según McLaughlin (2010), el agua libre en el biochar se elimina a 105 °C y a 200 °C el agua adsorbida. También mencionó que calentar por encima de 105 °C puede encender aún más el biochar y liberar volátiles y humos, esto indica que biochar no es

completamente carbonizado y puede comportarse de manera diferente en el suelo comparado con el biochar completamente carbonizado.

2.4.2.2. Contenido de material móvil y/o volátil

El contenido de materiales volátiles de un producto se define como la pérdida de masa de ese producto en forma gaseosa, excluyendo los vapores húmedos de la muestra de biochar, según las normas de la ASTM. McLaughlin et al. (2009) recomiendan sustituir la palabra "volátil" por la de "móvil" al referirse al biochar. Aunque este contenido puede ser eliminado en forma de gas, también puede ser causado por la degradación microbiana o la lixiviación, por lo que el término "móvil" se refiere a la falta de permanencia y es la materia permanentemente ausente que hace que la biomasa esté completamente seca, mientras que deja los constituyentes de la ceniza y las sustancias residentes en el biochar.

2.4.2.3. Contenido de ceniza

La ceniza es el componente inorgánico del biochar libre de humedad. La cantidad y composición de la ceniza en el biochar puede tener un impacto en algunas de las cualidades deseadas del material para usos específicos particulares. Las cenizas del biochar pueden utilizarse como indicador del contenido de concentración de nutrientes. El Silicio, calcio, potasio, sodio, y magnesio, son los minerales más comunes que se encuentran en la corteza terrestre. Una cantidad menor de azufre, fósforo, hierro, manganeso y aluminio también puede encontrarse en la corteza terrestre. Estos elementos pueden encontrarse en el biochar en forma de óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros y fosfatos (Ravedraan et al., 1995).

2.4.2.4. Contenido de carbono fijo

Debido a que el contenido de carbono fijo es el residuo del análisis del contenido móvil de la muestra, el contenido de carbono fijo se calcula restando a 100 el total de los porcentajes de cenizas y material volátil, todos expresados en base seca, como se describe en la Práctica Estándar de la ASTM.

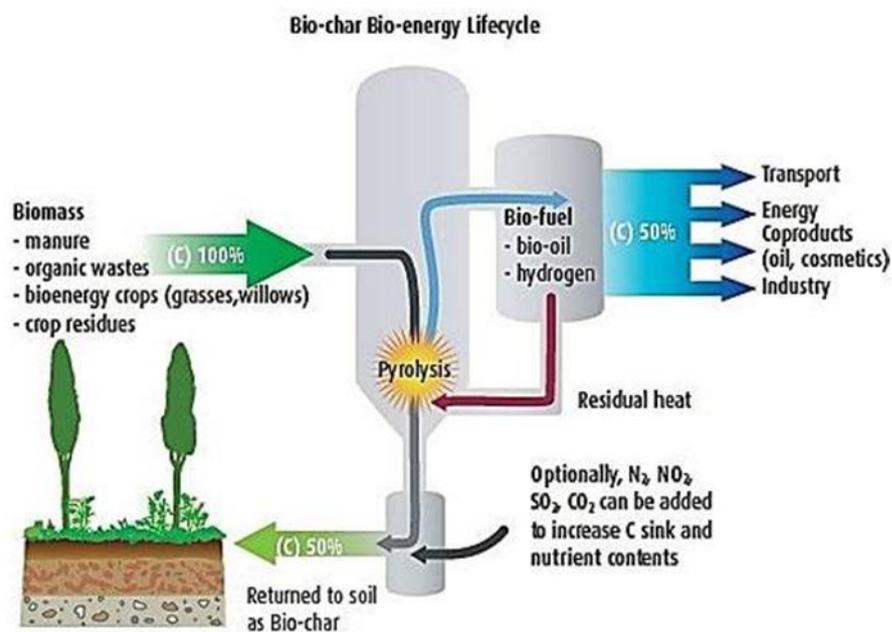
McLaughlin et al. (2009) creen que el componente de carbono fijo del análisis proximal del biochar no es el carbono puro, sino todo lo que no es ceniza y no se evapora cuando se

calienta a 950° C. En lugar de carbono residente, hidrógeno residente y oxígeno residente, la frase Materia Residente es más precisa ya que abarca todos estos elementos.

2.5. Pirólisis

Es un proceso de descomposición térmica en el que varios componentes se transforman en estructuras más pequeñas y se volatilizan como resultado del calor aplicado. Este proceso tiene lugar en ausencia de oxígeno y otros oxidantes, lo que ayuda a mantener la oxidación de los componentes al mínimo (Stauffer, 2013).

Es bien sabido que como resultado de este proceso se producen tres productos, cada uno de los cuales puede ser reconocido por su condición. La fase líquida se denomina bio- oil, la fase sólida se denomina biochar y la fase gaseosa se denomina Syngas (Stauffer, 2013).



Fuente: Stauffer (2013).

Figura 1. Sistematización del proceso de pirólisis.

Estas operaciones suelen realizarse a temperaturas que oscilan entre los 500°C y los 800°C. Sin embargo, se reconocen tres niveles de pirólisis: el primero se considera pirólisis lento (temperaturas entre 100°C y 300°C); el segundo se considera pirólisis intermedio (temperaturas entre 300°C y 500°C); y el tercero se considera pirólisis rápido (temperaturas

entre 500°C y 800°C). Los productos (sólidos, líquidos y gaseosos) generados a cada temperatura varían según el porcentaje de cada producto producido a la temperatura en cuestión (Laguarta, 2012).

En el estudio de Chen et al. (2016), la pared celular se destruye durante la pirólisis de la biomasa, aumentando la superficie en contacto con el medio oxidativo del suelo. Como resultado, el biochar producido a bajas temperaturas tiene una mayor proporción de carbono oxidable; esto se debe a que la celulosa y la hemicelulosa se descomponen primero para formar carbono amorfo y solo cuando se produce la degradación de la lignina se forma una estructura estable con carbono aromático.

La descomposición de la biomasa ocurre en etapas, según OSPINA et al. (2014). La primera etapa está asociada a la humedad (90 °C); la segunda etapa ocurre a los 200 °C, cuando la descomposición de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina comienza a dar paso al CO₂, a los compuestos volátiles como alcoholes, ácidos, fenoles y otros compuestos orgánicos. A los 600°C, la mayoría de los componentes se descomponen, dejando el carbono fijo en forma de residuo, que corresponde a la organización del material carbonoso no volátil. Debido a la existencia de heteroátomos como el oxígeno, el nitrógeno y el azufre, es posible ofrecer una amplia gama de grupos funcionales en los compuestos orgánicos.

Tabla 1. Cantidad de productos obtenidos en función de la tecnología pirolítica utilizada según Laguarta (2012).

	Líquido (Bio-oil)	Sólido (Biochar)	Gas (Syngas)
Pirólisis rápido	75%		
Temperatura moderada (500°C)		12%	13%
Tiempo de residencia del vapor corto (2 s)	(25% de agua)		
Pirólisis intermedio	50%		
Temperatura moderada- baja	(50% de agua)	25%	25%

Tiempo de residencia del vapor moderado

Pirólisis lento	30%		
Temperatura moderada-baja	(70% de agua)	35%	35%
Tiempo de residencia del vapor largo			

Fuente: Mateo (2013).

Tabla 2. Componentes de la biomasa lignocelulósica y sus rangos de descomposición térmica.

Componente	Temperatura de descomposición (°C)
Agua	>120
Hemicelulosa	200 – 260
Celulosa	240 – 350
Lignina	280 – 500

Fuente: Ospina-Guarín et al. (2014).

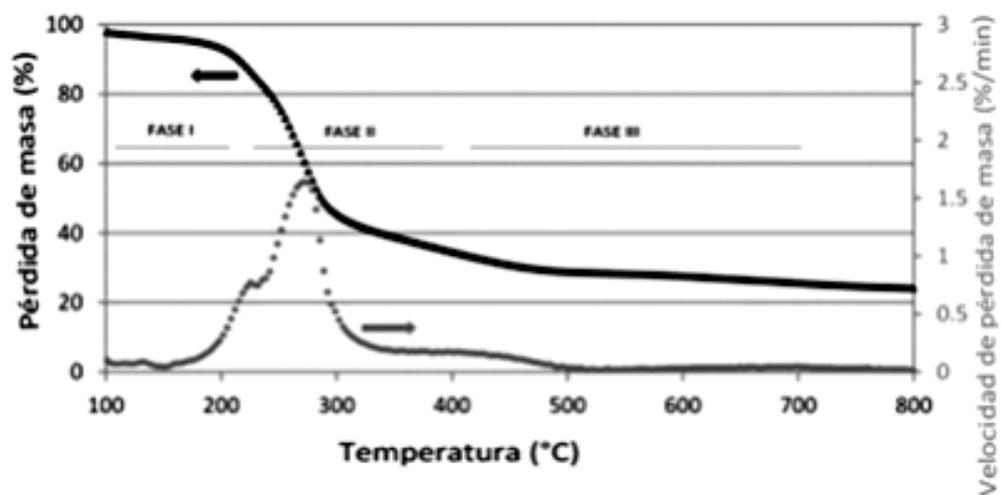
2.5.1. Proceso de la pirolisis

La síntesis del biochar a partir de la biomasa es un proceso complicado en el que tienen lugar una serie de reacciones en distintos plazos y orden. Como resultado de la investigación termoquímica, se descubrieron tres procesos relacionados con la degradación de los tres componentes principales de la biomasa, hemicelulosa, celulosa y lignina (Gómez et al., 2008).

según Demirbas citado por Urien (2013), la eliminación del agua (humedad de la biomasa) y de algunos residuos no reactivos, es el primer paso del proceso (1). La producción inicial de compuestos volátiles y gases se produce durante la etapa intermedia, que se caracteriza por la producción de biochar primario (2). Después de someterse a la transformación térmica, el biochar primario se descompone, dando lugar a la formación de sólidos residuales con un alto contenido de carbono fijo, que luego se transforma térmicamente de nuevo para producir un producto final (biochar), al que sigue la generación de compuestos volátiles y gases (3).

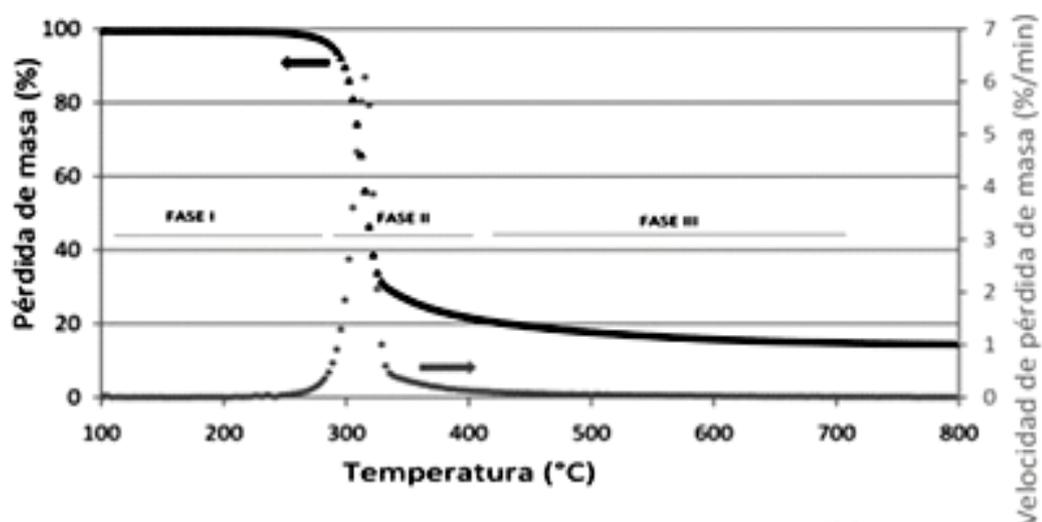
- a) Biomasa = Agua + residuo no reactivo (1)
- b) Residuo no reactivo = (compuestos volátiles + gases) + (biochar primario) (2)
- c) (Biochar primario) (compuestos volátiles + gases finales) = (biochar final) (3)

La descomposición de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina son los componentes clave de la biomasa, y su descomposición térmica determina la velocidad a la que se descompone. Durante la pirólisis, estos tres componentes sufren una serie de procesos de descomposición, que varían en función de la biomasa que se procesa. Dado que cada componente tiene una estructura y composición únicas, esto depende de cada uno de ellos (Mohan et al., 2006).



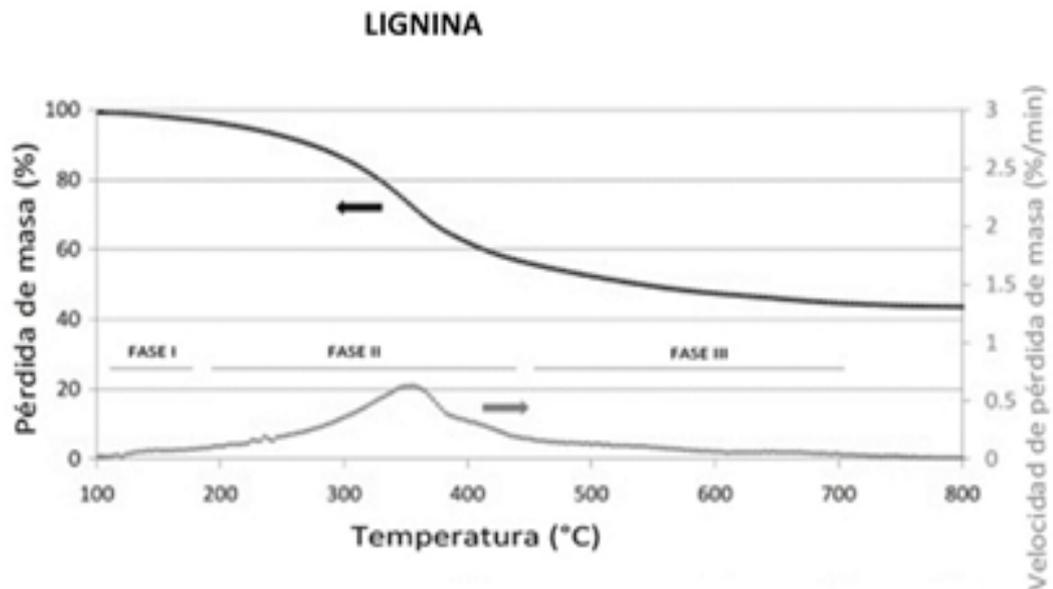
FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

Figura 2, Pirólisis de la hemicelulosa.



FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

Figura 3. Pirolisis de la celulosa.



FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

Figura 4. Pirolisis de la lignina.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran la estructura de masa y la tasa de pérdida de masa de hemicelulosa, celulosa y lignina, respectivamente. Como puede ver, hay tres etapas principales en la descomposición del componente lignocelulósico durante la pirólisis (Collard y Blin, 2014).

Etapa I, que corresponde a la deshidratación y transformación estructural de los compuestos más inestables debido al proceso de redistribución o fragmentación.

La fase II, tiene la tasa más alta de pérdida de masa y es el resultado de la reducción molecular.

La fase III implica un proceso de carbonización sólida que reordena el anillo de benceno en varios tipos de estructuras policíclicas.

Según Collard y Blin (2014), la descomposición de la hemicelulosa, la celulosa y la lignina se produce en varios rangos de temperatura de pirólisis. La hemicelulosa se descompone a temperaturas que van de 150 a 350°C, la celulosa se descompone a temperaturas que van de 275 a 350 °C, y la lignina se descompone a temperaturas que van de 250 a 500°C.

Según Yang et al. (2006), no hay una interacción sustancial entre la hemicelulosa, la celulosa y la lignina durante el proceso de pirólisis, lo que indica que la pirólisis de la biomasa

consta de tres componentes que desempeñan cada uno una función distinta en el proceso de descomposición. Por debajo de 220°C, se producen cambios en la humedad; entre 220 y 315°C, se produce la descomposición de la hemicelulosa; entre 315 y 400°C, se produce la descomposición de la celulosa; y más allá de 400°C, cuando se produce la descomposición de la lignina principalmente.

2.6. Rendimiento

La pirólisis lenta a baja temperatura puede producir rendimientos de biochar que oscilan entre el 20% y el 50% para una variedad de materias primas o residuos; son frecuentes los rendimientos de hasta el 35%. El rendimiento del biochar se ve afectado por una serie de parámetros, como las tasas de calentamiento, las altas presiones, el contenido de humedad, la resistencia al vapor y la composición química de las materias primas utilizadas en su producción (Edmunds, 2012). Utilizando el método de rendimiento para medir la producción de biochar, la relación entre la proporción de masa de biomasa introducida en el horno pirolítico y la masa de carbón producida se establece como un porcentaje de la biomasa total introducida en el horno (Capraro, 2012). El rendimiento se estima dividiendo la cantidad o peso del producto final (biochar en frío) obtenido y el peso de la materia prima (biomasa seca) utilizada al inicio del mismo. A continuación, se muestra la representación porcentual de la relación:

$$\% R = \frac{m}{mb} \times 100 \quad (1)$$

- Rendimiento (R).
- Masa de Biochar (m).
- Masa de biomasa (mb).

2.6.1. Toxicidad

El biochar dentro del sistema del suelo tiene el potencial de introducir una amplia gama de sustancias orgánicas peligrosas compuestos (como, por ejemplo, metales pesados, PAH), que pueden existir como contaminantes de materias primas contaminadas o en biochar generado en condiciones de procesamiento favorables para su producción. El control estricto de los tipos de materias primas y las condiciones de procesamiento utilizadas puede reducir el riesgo potencial de contaminación del suelo, evidencia experimental de la ocurrencia y

biodisponibilidad y toxicidad de tales contaminantes en el biochar y el suelo enriquecido con biochar (con el tiempo) permanecen escasos. Por lo tanto, una evaluación de riesgo completa de cada producto de biochar es esencial antes de su inclusión en el suelo, teniendo en cuenta el tipo de suelo y las condiciones ambientales (Verheijen et al., 2009b).

La toxicidad se define como los efectos nocivos de un contaminante en un organismo vivo, generalmente un veneno o una mezcla de venenos. La toxicidad es el resultado de la concentración y el tiempo de exposición, dependiendo de la variabilidad como la temperatura, formas químicas y disponibilidad (APHA, 1992).

El biochar puede afectar potencialmente a muchas funciones del suelo y servicios ecosistémicos diferentes e interactúa con la mayoría de las "amenazas del suelo". Eso es debido a la amplia gama de implicaciones de la aplicación de biochar a los suelos, combinado con la irreversibilidad de su aplicación, y es necesario realizar más investigaciones interdisciplinarias antes de que se puedan implementar políticas (Verheijen et al., 2009b).

2.6.1.1. Toxicidad aguda

Esto generalmente es causado por la exposición a altas dosis de compuestos tóxicos en un corto período de tiempo. Los efectos rápidos sobre los organismos vivos, generalmente la muerte, se pueden utilizar para determinar la concentración letal de compuestos residuales o aguas residuales durante un período de tiempo (Nuñez y Hurtado, 2005).

La toxicidad aguda tiene efectos graves (generalmente mortales) en el cuerpo con una exposición a corto plazo. Todos los contaminantes pueden ser tóxicos, dependiendo de su concentración, los organismos expuestos y las condiciones ambientales expuestas. Las concentraciones de sustancias por debajo de los límites permisibles pueden tener un efecto inhibitorio en la capacidad reproductiva de un organismo o en el caso de cladóceros se evalúa la inmovilización (Persoone et al., 2009).

2.6.1.2. Toxicidad crónica

Las dosis muy bajas de una sustancia tóxica o de un efluente durante un largo período de tiempo pueden ser mortales o subletales (no lo suficiente como para causar la muerte). Los impactos bioquímicos, fisiológicos y de comportamiento, así como la mutagenicidad y la genotoxicidad, pueden producirse a niveles subletales a lo largo del ciclo vital de un organismo,

interfiriendo en su crecimiento y desarrollo normales. Recientemente se ha mostrado un gran interés por los enfoques para detectar concentraciones subletales de toxicidad como forma de identificar el daño ambiental antes de que sea irreversible (Nuez y Hurtado, 2005).

2.6.2. Parámetros toxicológicos

2.6.2.1. Concentración Letal Media (CL50)

Compuestos tóxicos a altas concentraciones que provocan la muerte de un organismo. La concentración letal media es un término que se utiliza a menudo (50%). Dicho de otro modo, se considera letal una concentración que mata al 50% de los organismos expuestos en una determinada duración de la exposición (APHA, 1992).

Este valor característico crucial, conocido como CL50 para la concentración letal media, se determinó administrando un estímulo a 50 personas de la población investigada y observando si respondían o no al estímulo. Es necesario identificar el tiempo de exposición al estímulo para comparar y evaluar las intensidades relativas del estímulo, por ejemplo, DL50 de 24h (dosis letal media de 24h).

Es necesario determinar el valor de DL50 para compuestos específicos o sustancias complejas que se consideran medios o sustancias mixtas como las aguas residuales (Nuñez y Hurtado, 2005) para determinar los umbrales de toxicidad.

Según Castillo (2004), el análisis probit (con o sin ajuste) suele utilizarse para calcular las concentraciones LC50, EC50 y LD50 de una sustancia. Cualquiera de los siguientes síntomas indica que se está experimentando una reacción peligrosa típica:

$$p = \left(\frac{r}{n}\right) \times 100 \quad (2)$$

- Concentración de la sustancia o dosis (d).
- Número de individuos (n).
- Numero de organismos muertos o afectados (r).

- Porcentaje de efecto (p).

La representación gráfica de la p vs d, o relación dosis-respuesta, da lugar a una curva parabólica, que suele ser difícil de encajar en un modelo lineal. Si se utiliza una escala logarítmica para resolver este problema ($X = \log_{10}(d)$), que presenta una relación dosis-respuesta normal en forma de S o sigmoïdal, la distribución de p frente a X será de tipo normal, que es un método a tener en cuenta.

A continuación, utilizando la tabla probit, porcentaje de efecto (p) se convierte en unidades probit (buscando en una tabla de distribución normal el valor z que corresponde a una probabilidad acumulada igual a p y añadiendo luego cinco unidades), y se obtiene una distribución de puntos en un sistema lineal bivariante. A continuación, estos puntos se procesan según un procedimiento estándar de análisis de regresión.

2.6.2.2. Nivel observado de sin efectos adversos (NOAEL)

En el campo de la toxicología, el NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) se refiere a la mayor dosis de un fármaco que no ha demostrado ser perjudicial para la salud en personas o animales investigados (Castro, 2013).

2.6.2.3. Nivel más bajo de efectos adversos observados (LOAEL)

Es la menor concentración o cantidad de una sustancia química que da lugar a un cambio observable y perceptible en una medida de control aceptable, que se conoce como LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level) (Castro, 2013).

2.7. Extracto del biochar

La extracción es el método más utilizado cuando se trata de separar moléculas orgánicas de mezclas de reacción o de sus fuentes naturales. Se puede describir como el proceso de separar una sustancia química de una mezcla utilizando un disolvente para lograr la separación (Cueva et al., 2010).

2.8. Bioensayos toxicológicos

Los ensayos de toxicidad consisten en identificar la presencia de contaminantes en una determinada población de organismos y evaluar su impacto en esa población de organismos. Cuando se realizan pruebas biológicas, se utilizan tejidos biológicos, organismos o grupos de organismos como reactivos para analizar los efectos de las sustancias fisiológicamente activas en circunstancias de laboratorio específicas y controladas. Estos efectos pueden ser inhibidores o amplificadores, dependiendo de la interacción entre los organismos, y pueden manifestarse de diversas formas, como mortalidad, crecimiento, proliferación, multiplicación, modificaciones morfológicas, fisiológicas e histológicas (Hader y Erzinger, 2015).

2.8.1. Tipos de ensayos toxicológicos

Según López y Grau (2005) los diferentes tipos de ensayos toxicológicos se presentan a continuación:

- Ensayos estáticos: sólo se requiere la instalación de cámaras de ensayo o montajes de las soluciones a utilizar en los ensayos y de los organismos a ensayar. En estos ensayos, las respuestas son siempre las mismas independientemente de la situación.
- Ensayos semi-estáticos: ya que el medio de ensayo se sustituye con frecuencia (por ejemplo, una vez cada 24 horas).
- Ensayos de flujo continuo: Estas pruebas se realizan en las que el medio de prueba en el que se encuentran los organismos se renueva continuamente.
- Ensayos de reproducción: el tiempo de exposición debe abarcar al menos tres generaciones de los organismos investigados. Permiten evaluar los efectos de un tóxico en el comportamiento reproductivo tras la exposición.
- Ensayos de recuperación: Tras el tiempo de exposición, los organismos de ensayo se transfieren a un medio de ensayo no tóxico y se observan en él durante el resto del experimento.

2.8.2. Bioensayos con *Lactuca sativa*

Lactuca sativa L. también conocida como lechuga, es una planta con una raíz pivotante y una estructura ramificada de unos 25 cm de longitud. Al principio, se forma una roseta de hojas alrededor de un tallo central, corto y cilíndrico, que con el tiempo se alarga para producir las inflorescencias, compuestas por capítulos amarillos agrupados en corimbos. Los márgenes de las hojas pueden ser lisos, ondulados o dentados, según el tipo de planta. Presenta un vilano plumoso en el exterior de las semillas (Plaza et al., 2005).

Entre los requisitos adecuados para el cultivo de lechugas, el pH óptimo del suelo es 6,7 y 7,4 (Yuste, 1997), y el umbral de conductividad CE es 1,3 dS/m, donde la disminución del rendimiento para distintos niveles de conductividad eléctrica es la siguiente: 0% para 1,3 dS/m; 10% para 2,1 dS/m; 25% para 3,2 dS/m; 50% para 5,1 dS/m y 100% para 9 dS/m (Ayers y Westcot, 1985), Además, requieren de suelos ligeros de textura franca (Benacchio, 1982).

Según Giaconi y Escaff (2004) describen las características germinativas de la semilla.

- Semillas/gramo: 800
- Poder germinativo mínimo: 80 %
- Pureza: 98%
- Germinación: 4 – 7
- Longevidad: 5 años

Se utilizan los bioensayos para determinar los efectos tóxicos de los compuestos solubles presentes en concentraciones tan bajas que no inhiben la germinación, pero sí retrasan o inhiben el alargamiento de la raíz y del hipocótilo de la planta, como indicadores representativos del crecimiento y la formación de la planta. Esto permite determinar los efectos tóxicos de los compuestos solubles presentes en concentraciones tan bajas que no retardan o inhiben el crecimiento de la radícula o del hipocótilo, pero sí retardan o inhiben la elongación de la raíz y del hipocótilo de la planta (Sobrero et al., 2004).

Según Rodríguez et al. (2014), clasifican taxonómicamente al cultivo de la lechuga en:

- Reino : Plantae

- División : Magnoliophyta
- Clase : Magnoliopsida
- Orden : Asterales
- Familia : Asteracea
- Subfamilia : Cichorioideae
- Tribu : Lactuceae
- Género : Lactuca
- Especie : *L. sativa* L.

2.8.3. *Lactuca sativa* L. var. *acephala* Dill

Esta variedad de lechuga se distingue por la presencia de hojas sueltas y dispersas, que corresponden a las llamadas Lollo Rosa, Lollo Bionda, Hoja de Roble, y otras variedades afines. Son las lechugas de hoja suelta, que se denominan así porque, como su nombre indica, esta variedad de lechuga no forma una cabeza, sino que sus hojas quedan sueltas y sin encapsular. Sin embargo, a pesar de que se venden enteras, su principal ventaja en los huertos domésticos es el hecho de que sus hojas pueden recogerse individualmente.

También pueden cultivarse en tierra, pero son especialmente adecuadas para el cultivo hidropónico. Estas plantas crecen en una roseta muy plana, y el contenido de antocianina de las hojas varía de una planta a otra, lo que da lugar a una variedad de tonalidades o combinaciones de colores vibrantes. Además, la forma de los bordes de las hojas es muy diversa de una planta a otra (Saavedra et al., 2017).



Fuente: Centro de investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral - UNALM

Figura 5, Lechugas Lollo Bionda y Lollo Rossa (Variedad black rose).

La lechuga es un cultivo hortícola que se cultiva tanto en interior como en exterior, lo que la convierte en un cultivo global en cuanto a métodos de producción. Es una hortaliza de clima frío que tiene cierta resistencia a las heladas ligeras en sus primeras etapas. Sin embargo, a medida que se acerca la cosecha, se vuelve más susceptible a las heladas en las hojas exteriores, lo que la hace más vulnerable a los ataques de enfermedades (Giacconi y Escaff, 2004).

2.8.4. Semilla y germinación

La semilla de la lechuga se clasifica como un aquenio en términos botánicos, que se describe como un fruto seco, maduro y de una sola semilla. Las semillas se sumergen en agua, lo que provoca la activación de una serie de procesos fisiológicos que dan lugar al inicio del proceso de germinación. Para completar este procedimiento, hay varias fases, algunas de las cuales se muestran en la Figura 6. (Saavedra et al., 2017).

La penetración del agua y la hidratación de la membrana celular son los pasos iniciales del proceso de absorción. Una vez completado el proceso de absorción, comienza el desarrollo de la radícula hasta que rompe el tegumento y comienza la elongación, que continúa con la

emergencia de los cotiledones. Se trata de un proceso de expansión y elongación de los tejidos que depende de las reservas alimentarias de la semilla, así como de la cantidad de humedad a la que tenga acceso. Una vez que la plántula emerge y obtiene luz, se transforma en una planta autótrofa; las raíces son muy capaces de tomar agua y nutrientes, y los cotiledones son capaces de realizar la fotosíntesis hasta que se desarrolla el primer par de hojas genuinas (Saavedra et al., 2017).



Fuente: Manual de producción de lechuga – UNALM.

Figura 5, Etapas del proceso de germinación de una semilla de lechuga.

La temperatura tiene el segundo mayor impacto en la germinación después de la humedad. El rango de temperatura óptimo para la germinación de las semillas de lechuga se sitúa entre los 18 y 21°C. Las temperaturas superiores a 26°C pueden provocar su mal funcionamiento, lo que se conoce como resistencia al calor (Ryder, 1999). El tiempo de la termodinámica está determinado por el tipo y la diversidad de la misma (Saavedra et al., 2017).

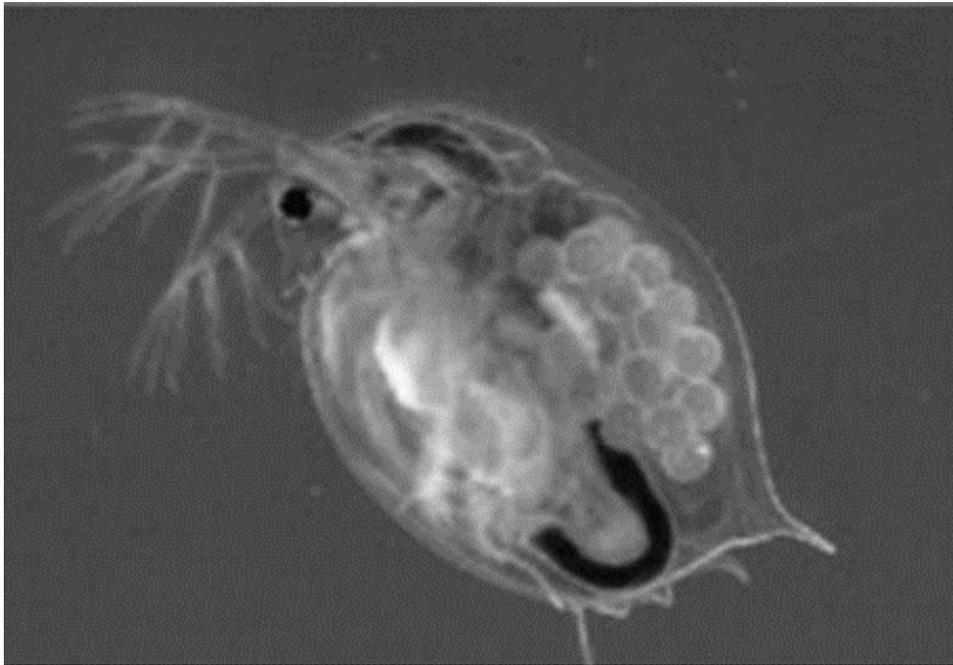
2.8.5. Daphnia magna

En los ensayos de ecotoxicidad, la *Daphnia magna* es el crustáceo más utilizado debido a la facilidad con la que se puede entrenar en el laboratorio y a su breve ciclo vital. Asimismo, *D. magna* es una excelente representación del zooplancton en los estudios y ensayos de ecotoxicología (Dodson y Hanazato, 1995). *Daphnia magna* se cultiva de acuerdo con los procedimientos típicamente sugeridos por la norma ISO 6341 (1982), así como con otras metodologías de cultivo detalladas en otros artículos (Ferrando et al., 1999), todas las cuales

requieren mucho tiempo y son costosas (véase la Tabla 1). Las Daphnias son crustáceos planctónicos con más de 100 especies que se alimentan de partículas suspendidas en el agua, a las que se denomina filtradoras, según Ebert (2005). Su diminuto tamaño y sus grandes antenas diferencian a los machos de las hembras; sus antenas son el principal medio de movilidad; su comida favorita son las algas; e ingieren partículas cuyo tamaño oscila entre una micra y cincuenta micras. Su cuerpo está compuesto por una cabeza y un tronco que están rodeados de un esqueleto exterior hecho de quitina y polisacáridos, con una doble pared entre la que se encuentra la hemolinfa (Rottmann, 2003).

2.8.6. Principio de la prueba

Dentro del grupo de los cladóceros, las especies del género *Daphnia* especies como *D. magna*, *D. pulex*, y *D. similis*, son los organismos de referencia más utilizados para las pruebas de toxicidad. Su amplia distribución geográfica, su importante papel en las comunidades de zooplancton, su facilidad de reproducción en el laboratorio, su partenogénesis, y su corto ciclo de vida con la producción de un gran número de crías, la convierten en una especie ideal para la evaluación de la toxicidad a nivel general. Existe una gran cantidad de información sobre las técnicas de cultivo, la temperatura, luz y necesidades de nutrientes, y su respuesta a muchos compuestos tóxicos. Específicamente, la prueba de toxicidad con *D. magna* (Figura 7), pueden medir la letalidad de sustancias puras, aguas residuales domésticas e industriales, lixiviados, aguas superficiales o subterráneas, agua potable, y sedimentos porosos (Díaz et al., s/d).



Fuente: Ensayos para agua dulce – IDRC / IMTA (Canadá).

Figura 7, Vista general de la *Daphnia magna*.

Los neonatos de menos de 24 horas de edad se exponen a las muestras o a la sustancia de ensayo durante un total de 48 horas, tras las cuales se cuenta el número de organismos muertos. Estos resultados proporcionan una estimación de la tasa o el porcentaje de muerte que se ha producido en el estudio (Díaz et al., s/d).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación política y geográfica

3.1.1. Ubicación política

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el campus de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

- Departamento : Lima.
- Provincia : Lima.
- Distrito : La Molina.

3.1.2. Ubicación geográfica

La fase experimental de la presente investigación se llevó a cabo, en el Laboratorio de Tesis de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

- 18 L : 8 663 624 E
- UTM : 287 969 N
- Altitud : 243,7 m.s.n.m.

3.2. Aspectos ambientales

Temperatura promedio en La Molina

Del 4 de enero al 6 de abril hay 3,0 meses de clima cálido, con una temperatura máxima diaria media superior a los 25°C durante todo ese tiempo.

Del 10 de junio al 16 de octubre, la estación fría dura 4,2 meses, con una temperatura máxima diaria media inferior a 21°C.

Precipitación

En cuanto a los días de lluvia (aquellos con más de 1 milímetro de precipitación líquida o equivalente líquido), la frecuencia de los días húmedos en La Molina no difiere mucho de una temporada a otra. La frecuencia oscila entre el 0% y el 1%, siendo la media del 0% la cifra más habitual.

Diferenciamos entre los días húmedos que sólo tienen lluvia, los que sólo tienen nieve y los que tienen una mezcla de ambos. El mes con mayor número de días de lluvia únicamente en La Molina es octubre, con una media de 0,3 días cada mes. Según esta clasificación, la lluvia es la forma de precipitación más frecuente a lo largo del año, con una probabilidad máxima de 1% el 18 de octubre según Weather Spark (2020).

Humedad

El punto de rocío se utiliza para medir el grado de confort en términos de humedad, ya que influye en que la transpiración se evapore de la piel y, por lo tanto, refresque el cuerpo. Generalmente, cuando los puntos de rocío son más bajos, parece más seco, y cuando los puntos de rocío son más altos, se siente más húmedo. En comparación con la temperatura, que tiende a fluctuar significativamente entre la noche y el día, el punto de rocío fluctúa mucho más lentamente, por lo tanto, aunque la temperatura baje por la noche en un día húmedo, sigue siendo húmeda por la noche en un día húmedo.

La humedad percibida en La Molina varía mucho de un lugar a otro.

Desde el 31 de diciembre hasta el 13 de abril, se tarda 3,4 meses en experimentar la mayor cantidad de lluvia, y durante todo ese tiempo, el nivel de confort es húmedo, opresivo o intolerable durante al menos el 13% del tiempo, según Weather Spark, que hace un seguimiento de las condiciones meteorológicas (2020).

3.3. Materiales y métodos

3.3.1. Materiales

Columna de tamices: 2 mm, mortero o molienda, matraces de 250 mL, papel filtro (#1 o 40), probetas de 100 ml, fiola de 100 mL, vasos de precipitación de vidrio de 1 L, luna de reloj, crisoles de porcelana con tapas de porcelana, varillas de vidrio, pinzas, placas Petri, embudos de vidrio, 10 pipetas pasteur, 1 caja de guantes de nitrilo, 1 pizeta de agua, 1 mortero de porcelana, papel toalla, baldes de 200 litros, acuarios de 6 L, temporizador de luz, luces blancas led, aireador de piedra, bomba de aire, desecador con silicagel, espátulas, bolsas ziploc de polietileno, reglas, mascarilla quirúrgica, guardapolvo.

3.3.2. Reactivos

Hidróxido de sodio al 17,5%, Clorito de sodio al 1,5%, Ácido acético al 10%, Ácido sulfúrico (H₂SO₄ al 96%), Agua destilada.

3.3.3. Equipos

Horno de mufla (900 ± 5°C), Horno estufa (105 ± 3°C), pH metro marca Hanna, conductímetro marca Hanna, mini molino eléctrico Thomas – Wiley, Agitador magnético, bomba al vacío, desecador, Estufa, Oxitop box, Balanza analítica marca Y GH-200.

3.3.4. Organismo de prueba

Se utilizó 5 paquetes de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Black rose) y neonatos de *Daphnia pulex*.

3.3.5. Software

Se utilizó el software estadístico: Microsoft Office Professional Plus Excel 2019 plus.

3.4. Tipo de investigación

El presente estudio es del tipo experimental ya que se expondrá a distintas concentraciones de biochar de cascarilla de *O. sativa* sobre *Daphnia magna* y *Lactuca sativa*.

3.4.1. Variables de investigación

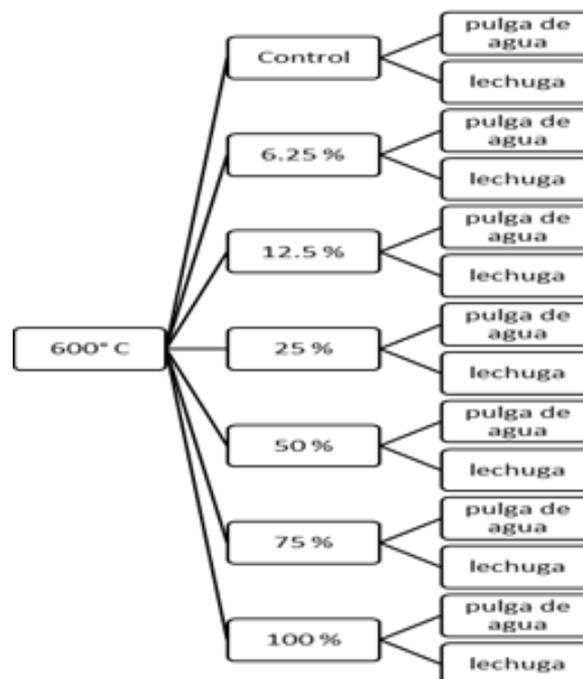
- Variable independiente: Biochar de cascarilla de *O. Sativa*.
- Variable dependiente: *D. magna* y *Lactuca sativa*.

3.4.2. Unidad experimental

Las semillas de *Lactuca sativa* (especie: black rose) y *Daphnia magna* (neonatos)

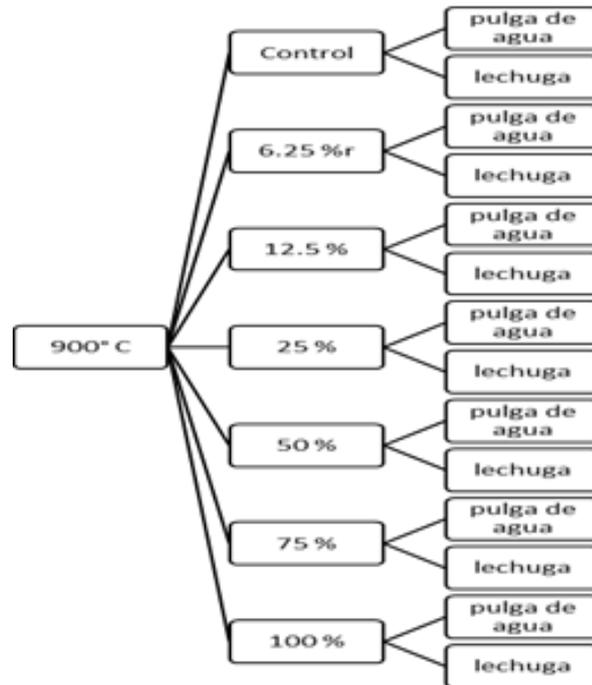
3.4.3. Diseño experimental

Al realizar el modelo de diseño experimental se determinó las variables empleados en la investigación con 7 tratamientos, teniendo así un cuadro de 1 X 7 X 2 con 5 repeticiones para cada tipo de biochar a 600°C y 900°C.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6, Diseño experimental del biochar a 600°C



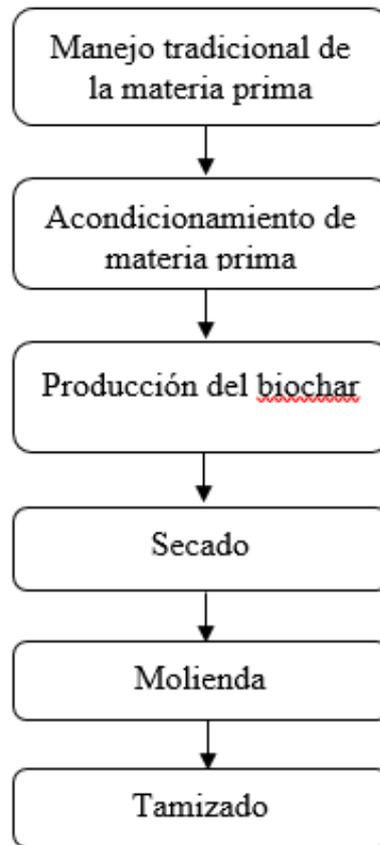
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7, Diseño experimental del biochar a 600°C

3.5. Metodología

3.5.1. Acondicionamiento de la materia prima y obtención del biochar de cascarilla de arroz

En la figura 8, se muestra el proceso por el cual se obtuvo biochar seco y listo para los análisis correspondientes. A continuación, se describen los pasos correspondientes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8, Flujograma para la obtención del Biochar.

3.5.1.1. Manejo tradicional de la materia prima

Una vez concluido el ciclo de producción de la cosecha y vertidos los restos en el campo, se recogieron muestras homogéneas de 50 kg por cada tipo de materia prima identificada durante la etapa de selección. A continuación, se analizaron las muestras. Se utilizó la recolección manual para obtener cada muestra, que se recuperó directamente de una piladora elegida al azar.

3.5.1.2. Acondicionamiento de materia prima

Las muestras se secaron a temperatura ambiente en una atmósfera abierta durante 24 horas después de recolectadas.

3.5.1.3. Producción del Biochar

El material obtenido se combinó y luego se dividió en secciones para su procesamiento en el horno de mufla con una capacidad de $900^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ de capacidad. Los pasos a seguir son las siguientes:

- a) Debido a que el proceso de pirólisis se realiza en un ambiente con cero entradas de oxígeno, fue necesario controlar las entradas de aire en la mufla para cada lote de producción de biochar, asegurando que no hubiera agujeros o fallas en la mufla.
- b) Las entradas de aire en la mufla se controlaron para cada lote de producción de biochar. Mientras el proceso de pirólisis estaba en marcha, se llevó a cabo una monitorización continua utilizando la pantalla de datos del horno de mufla.
- c) El proceso de pirólisis tardó una media de una hora en completarse y cuatro horas en enfriar el sistema una vez finalizado. A continuación, fue necesario retirar de la máquina la cámara interna que contenía el biochar.

Con el primer lote de producción de biochar se calculó el rendimiento de producción para cada tipo de biomasa seca empleada, garantizando la determinación y validación de la cantidad de materia seca por lote de producción, el tamaño óptimo de las partículas y el tiempo de producción para el segundo lote de producción de biochar.

3.5.1.4. Determinación del rendimiento del biochar de cascarilla de arroz

Durante el proceso de fabricación del biochar, el rendimiento se estimó dividiendo la cantidad o el peso del producto terminado (biochar enfriado) por la cantidad o el peso de la materia prima (biomasa seca) utilizada al principio del proceso. El rendimiento se representa como un porcentaje del peso del biochar dividido por el peso de la biomasa seca:

$$\text{Rendimiento} = (\text{Peso del biochar}/\text{peso de la biomasa seca}) \times 100$$

3.5.1.5. Enfriado

Las muestras se colocaron en un desecador con silicagel durante 24 horas para permitir su enfriamiento.

3.5.1.6. Molienda

La molienda de las muestras fueron procesadas en un mini molino eléctrico Thomas - Wiley modelo 2, redujo y estandarizó el tamaño de las partículas a menos de 2 mm de diámetro.

3.5.1.7. Tamizado

Las muestras fueron tamizadas en el Laboratorio de Suelos de la UNALM usando un mini molino eléctrico Thomas – Wiley, usando un set de tamices N° 20 para el análisis elemental, tamiz N° 40 para el análisis proximal y tamiz N° 60 para la determinación del poder calorífico ASTM.

3.5.1.8. Extracto del biochar

Terminado el ciclo de obtención del biochar, se preparó el extracto del biochar según el método reportado por Tortosa (2013) siguiendo los pasos del método de Zucconi et al., (1981), concentrado al 100 %, con agua destilada. La relación entre biochar y agua destilada es de 1:13,5 (1 gr de biochar en 13,5 ml de agua destilada), luego se agitó en un agitador magnético a 1500 rpm por 30 min, terminado el tiempo se filtró con equipo de filtración con bomba al vacío. De esta manera se acondicionó el biochar al 100% en estado líquido para su caracterización complementaria y prueba de toxicidad.

3.5.1.9. Preparación de estándares

Se preparó los siguientes estándares de los extractos de biochar, cuyas concentraciones en porcentaje son: 0; 6,25; 12,5; 25; 50; 75; 100% luego se colocan en cada fiola de 100 ml. Finalmente se completan los volúmenes a 100 ml con agua destilada.

3.5.2. Caracterización del biochar de cascarilla de arroz

Tabla 3. Parámetros de caracterización del biochar de cascarilla de arroz.

Parámetro	Unidades	Metodología
Humedad	% de masa total, base seco	<i>BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.8.2</i>
Cenizas totales	% de masa total, base seco	<i>ASTM American Society for testing and materials 1998 D 5142-90</i>
pH	pH	<i>Standard Methods 20 th Edition 4500-H+</i>
Conductividad eléctrica	dS/m	<i>Standard Methods 20 th Edition 2510</i>
Carbono orgánico (C_{org})	% de masa total, base seca	<i>BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.3 (Por Cálculo)</i>
Nitrógeno	% de masa total, base seco	<i>BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.2</i>
C/N	Ratio molar	<i>BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.4 (Por Cálculo)</i>
Poder Calórico	PCS(kCal/kg)	<i>ASTM D5865 - 13</i>

3.5.2.1. Determinación de la Celulosa

Se pesó 1 g de la muestra con una precisión de 0,1 mg utilizando una balanza calibrada. La muestra pesada se introdujo en un globo de 100 mL lleno de refrigerante y se dejó refluir durante 30 minutos. En este experimento se utilizaron 2,25 g de hidróxido de sodio (solución al 17,5%) para hacer la solución. Durante los primeros 5 minutos, se dejó reposar antes de pasarla al filtro. Se añadieron 5 ml de NaOH, se agitó y se dejó reposar durante 1 hora, tras lo cual se decantó el líquido en el crisol filtrante N°2, se añadieron 30 ml de agua destilada más 25 ml de NaOH y se dejó reposar durante 1 hora, tras lo cual se lavó con 30 ml de agua destilada y se dejó reposar durante 10 minutos. Se agregó 15 ml de ácido acético al 10% por 3 minutos, se agitó y se pasó a filtrar. Se secó en un horno a 105 °C ± 2 °C hasta que alcanzó un peso

constante. Se utilizó la siguiente fórmula para calcular el porcentaje medio de celulosa con dos decimales, lo que dio la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Celulosa} = \text{Peso de la muestra seca} - \text{peso del papel filtro} \times 100$$

3.5.2.2. Determinación de Holocelulosa:

Se pesó 1g de muestra seca al aire libre de extractivos. Después de colocarlo en un vaso de precipitados de 1 litro y trabajarlo con 75 mL de solución de clorito sódico al 1,5% y 5 gotas de ácido acético concentrado al 10%, se cubrió la muestra con un vidrio de reloj y se dejó en un refrigerante a reflujo durante 40 minutos, agitando cada 10 minutos. Se registraron los resultados. A continuación, se añadieron 5 gotas de ácido acético concentrado y 1 g de clorito sódico, y se repitió el procedimiento cada 40 minutos hasta completar el proceso cuatro veces en total. Una vez terminado el procedimiento, se dejó enfriar la solución antes de filtrarla en un crisol que se había pesado previamente. A continuación, se secó en una estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Se enfrió en un desecador antes de pesarlo en una balanza con una precisión de 0,01g. Se utilizó la siguiente fórmula para calcular la proporción de holocelulosa en la muestra:

$$\% \text{ Holocelulosa} = \text{Peso de la muestra seca} - \text{peso del papel filtro} \times 100.$$

3.5.2.3. Determinación de la Lignina

Se colocó 1g de muestra en un vaso de 50 ml, se agregó lentamente 15 ml de ácido sulfúrico frío macerando el material con una varilla de vidrio. Manteniéndose el recipiente en un baño a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, agitándolo constantemente, cubriendo con un vidrio de reloj dejarlo en baño María a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ por dos horas, agitando frecuentemente a 450 rpm. Al cabo de las dos horas se pesó el contenido del vaso, diluyendo con agua hasta obtener una concentración de ácido al 3% correspondiente a un volumen total de 560 ml. Se puso a hervir durante 4 horas a reflujo para mantener el volumen constante, dejando que el material insoluble (Lignina) se sedimente durante la noche o más tiempo si es necesario, decantando el líquido sobrenadante sobre el crisol filtrante previamente pesado. Se transfirió luego la lignina al filtro usando agua

caliente y una varilla de vidrio. Se llevó a la estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante. Se enfrió en un desecador y se pesó.

$$\% \text{ Lignina} = \text{Peso de la muestra seca} - \text{peso del papel filtro} \times 100$$

3.5.2.4. Determinación de la Hemicelulosa

La hemicelulosa se determinó por diferencia de la cantidad en porcentaje de la holocelulosa y celulosa.

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \% \text{ Holocelulosa} - \% \text{ Celulosa}$$

3.5.2.5. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente se determinó de acuerdo con las especificaciones de los lineamientos análogos la norma ASTM D2854-09 (Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon) y el manual TMECC 03,03 (Test Method for the Examination of Composting and Compost - Bulk Density) utilizado en el estudio anterior. En cuanto a la determinación, ambos utilizan el mismo concepto.

- Densidad Aparente recibida (g/mL) = masa del carbón (g)/Volumen del carbón ocupado (mL).
- Densidad Aparente seca (g/mL) = Densidad Aparente recibida X $[1 - (\text{CH} \% / 100)]$
- Determinar el nivel de toxicidad del carbón producido a partir de *O. sativa*.

3.5.2.6. Pruebas de toxicidad con Lactuca sativa

Se construyeron un total de 35 cajas de Petri de 10 cm de diámetro, en las que se introdujo un disco de papel de filtro humedecido con 2 mL del extracto obtenidos a partir de los estándares, evitando el desarrollo de bolsas de aire. Fue necesario repetir este procedimiento para cada una de las siete concentraciones y cinco repeticiones preparadas con el extracto de biochar (Plaza et al., 2005).

Con el uso de pinzas, se insertaron cuidadosamente las 10 semillas de lechuga, con suficiente espacio entre las semillas para permitir el alargamiento de las raíces. Para el caso del

control negativo, se vertió 2 mL de agua destilada en el papel de filtro y se dejaron caer las semillas sobre él.

Se incubaron en un lapso de 72 horas, en completa oscuridad y a 21° C en una estufa climatizada (la incubadora Oxitop del laboratorio de química, este proceso se repitió cinco veces), después de lo cual se tomaron medidas de las longitudes del tallo y de la raíz, observándose una elongación creciente en los resultados hasta la concentración de 12,5% para el biochar obtenido a 600°C, mientras que a la concentración de 50% la elongación se detiene. Para el biochar de 900°C sólo se observa elongación a una concentración del 6,25%; a concentraciones más altas, la elongación es despreciable, y a una concentración del 75%, la elongación se detuvo por completo.

3.5.2.7. Pruebas de toxicidad con *Daphnia magna*

Para evaluar la sensibilidad de las cepas frente al biochar, se calculó la concentración efectiva media (EC 50), de acuerdo con las recomendaciones OECD/OECD 202 (2004). Se expusieron 6 neonatos de cada cepa a 15 mL de biochar en concentraciones de 0; 6,25; 12,5; 50; 75; y 100 (%) durante 48 horas para determinar la toxicidad.

Los estudios se llevaron a cabo con un pH de $7 \pm 0,5$, una temperatura entre 20 ± 2 °C, un fotoperiodo de 16:8 de luz/oscuridad, y no se proporcionó alimento durante toda la prueba. Cada experimento se realizó cinco veces. (American Public Health Association, 1992).

Según los valores LC50 obtenido para los biochars, utilizando una dosis de biochar de 900°C al 48,5%, se producirá la muerte del 50% del número de pulgas de agua *Daphnia magna*, mientras que con el biochar de 600°C, se producirá la muerte del 50% de las pulgas de agua *Daphnia magna* utilizando una dosis de 212%

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de biochar de la cascarilla de *Oriza sativa* (arroz) y su rendimiento de producción a escala de laboratorio

Se observa que todas las muestras de biochar se crearon en un rango de 1 hora utilizando el método de pirólisis lenta en una mufla diseñada para la producción de pequeños lotes de biochar con fines de investigación y análisis. Esto es coherente con los resultados anteriores. La mufla tiene un rango de temperatura máxima de 900°C y un rango de temperatura baja de 50°C, respectivamente. Cada materia prima se pirolizó dos veces, una por cada lote.

Tabla 4. Rendimiento del biochar de la cascarilla de arroz obtenidos a 600 °C y 900 °C.

Biochar	T° prom. (°C)	Tiempo (hrs)	Biomasa (g)	Biochar (g)	Rendimiento (%)
Cascarilla de arroz	600	1	155,6892	131,4316	84,419
	900	1	116,62	27,3632	23,464

La razón por la que la producción del biochar es un proceso que se realiza obligadamente en hornos pirolíticos con diseño anaeróbico o en laboratorios que contengan mufla, debido a que la quema a cielo abierto aporta cantidades importantes de CO₂ a la atmosfera (Prada et al., 2010), siendo así que la presente investigación se realizó en una mufla en el laboratorio de la UNALM.

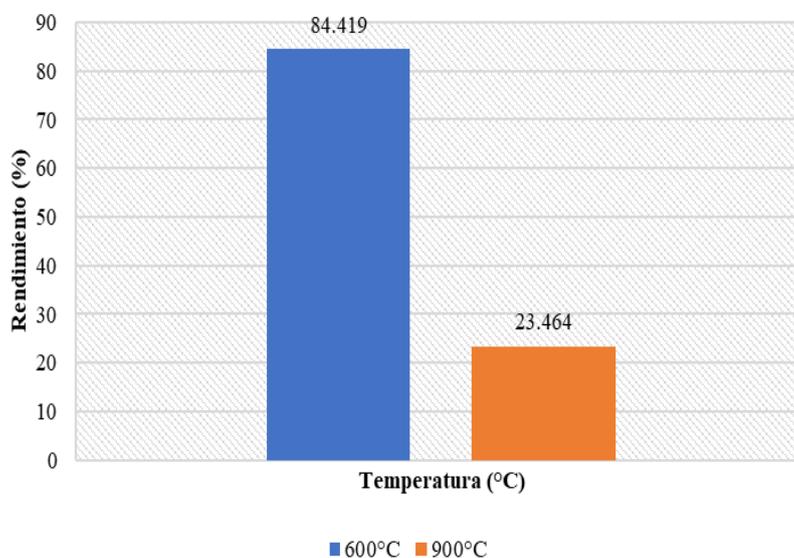


Figura 9. Efectos de la temperatura en el rendimiento de producción de biochar.

El rendimiento del biochar puede verse afectado por una serie de parámetros, según Edmunds (2012), incluyendo el ritmo de calentamiento y la presión a la que se aplica, la humedad, la temperatura, la resistencia al vapor y la composición química de la materia prima.

El rendimiento del biochar producido a partir de la cascarilla de arroz disminuye a medida que la temperatura aumenta de 600 °C (84,419 %) a 900 °C (23,464 %). Estos resultados coinciden con los de Brick y Wisconsin (2010), que encontraron que el rendimiento del biochar disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Dado el bajo contenido de humedad de la cáscara de arroz (10,11%), observamos que no hubo niveles de conversión termoquímica en la materia prima durante la pirólisis. Obtuvimos rendimientos de 84,419% (600°C) y 23,464% (900°C), resultando biochar con contenidos de humedad de 0,86% y 0,06% respectivamente.

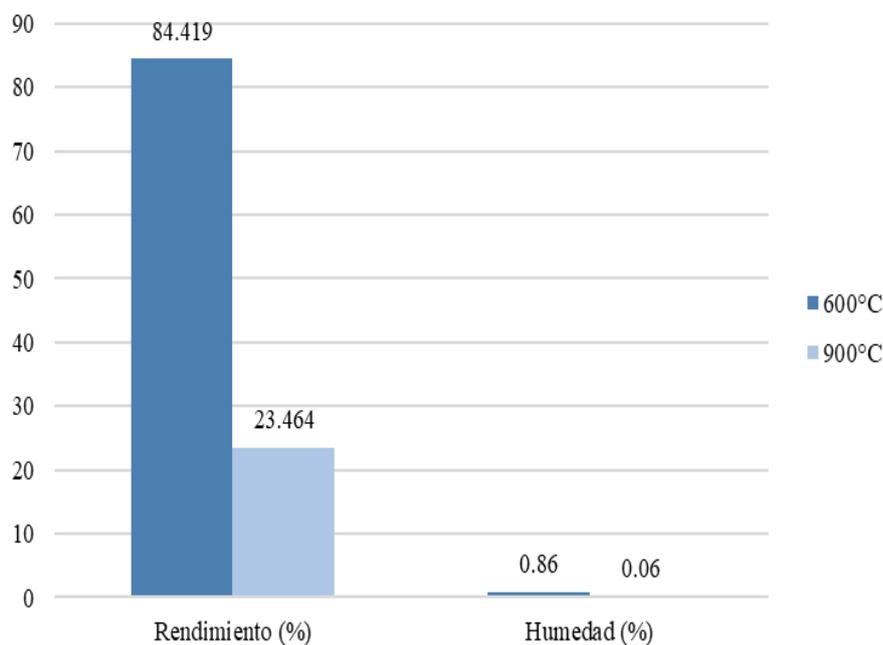


Figura 10. Relación directamente proporcional del rendimiento y humedad del biochar obtenido a 600°C y 900°C.

Según la investigación de Guerra (2015). La producción de biochar a partir de cáscara de arroz produce un rendimiento del 41,2 %, con un contenido de humedad del 11,0 %, según el autor. El contenido de humedad de la materia prima (cascarilla de arroz) en la presente

investigación es de 10,11 %, con rendimientos de producción de biochar a partir de cascarilla de arroz que van desde 84,419 % a 600 °C hasta 23,464 % a 900 °C. Esto se debe a que se trata de una materia prima con bajo contenido de humedad, y ésta está directamente relacionada con la temperatura utilizada en el proceso de combustión, como han señalado varios autores (Varon, 2005; Valverde, 2007). Además de la humedad, es uno de los factores que limitan el proceso de combustión. Dificultando el contacto entre el oxígeno del aire y la cacarilla, por lo que la presencia de agua en la cascarilla inhibe la combustión (Prada et al., 2010).

Además de la temperatura, el rendimiento de la producción se ve afectado por la pirólisis, ya que cuanto mayor sea la temperatura, menor será el rendimiento debido a los elementos creados durante el proceso (Scientia, 2007).

Por último, se ha descubierto que las materias primas con tamaños de partícula extremadamente pequeños o que son frágiles no corren el peligro de convertirse en cenizas durante el proceso de conversión termoquímica (Guerra, 2015).

4.2. Caracterización del biochar obtenido a partir de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) a nivel de laboratorio

4.2.1. Análisis físico

Se realizó, el análisis físico de la cascarilla de arroz y del biochar con el objetivo de ver si estas propiedades son similares para el suelo. A continuación, se exponen las principales propiedades y características de los biochar producidos.

Tabla 5. Análisis físico de la cascarilla de arroz y del biochar de la cascarilla de arroz obtenido a diferentes temperaturas.

Muestra	pH	C.E.	Densidad aparente
Cascarilla de arroz	7,39	653,0	0,39
Biochar 600°C	10,76	1597	0,46
Biochar 900°C	10,92	808	0,43

Como se puede observar en la Figura 13, el valor del pH es de 7,39; 10,76; 10,92 a temperaturas ambiente, 600 °C y 900 °C, como se puede observar este aumenta conforme se incrementa la temperatura lo cual es corroborado por Van Zwieten et al. (2010).

Los valores de pH van acordes con la naturaleza encalante del biochar, tipo de materia prima empleada, de su composición y de las condiciones de pirólisis. De acuerdo a la Figura 13, el pH del biochar se encuentra por encima del pH neutro (pH = 7,00), siendo el más bajo el del biochar de cascarilla de arroz (pH = 7,39) y el más alto el biochar obtenido a 900 °C (pH = 10,92).

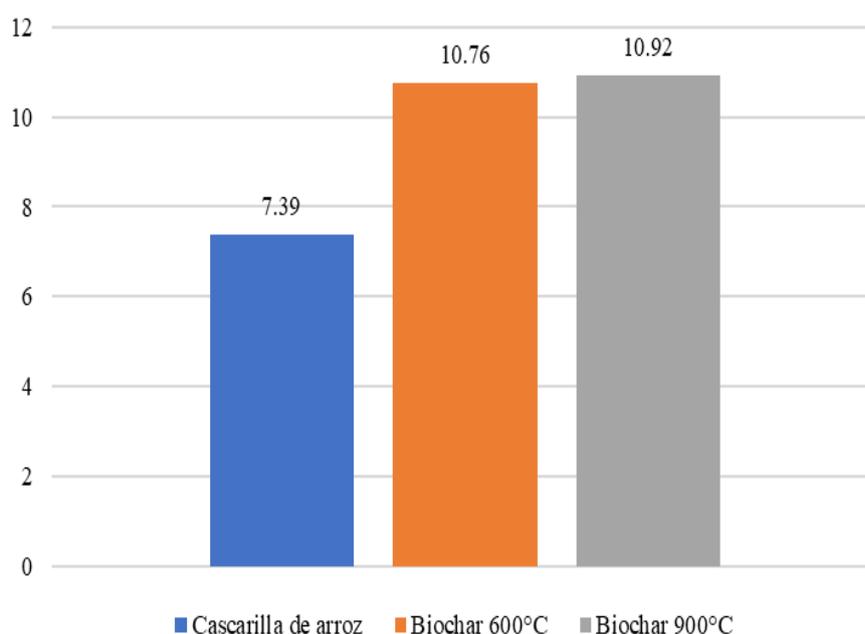


Figura 10, Variación del Ph (T° 22) a 600°C y 900°C de la cascarilla de arroz.

La alta concentración de carbonatos de potasio, y en menor medida de calcio y magnesio, presentes en la materia prima y por tanto en el biochar, según Guerra (2015), le confiere el efecto de encalado en los suelos y con ello la posibilidad de influir en la fertilidad del suelo y recuperar suelos ácidos por su pH básico. Cabe recalcar que los rendimientos bajan, mientras la temperatura aumenta, como lo corrobora Brick y Wisconsin (2010). El resultado de 23,464% de rendimiento versus los altos valores de pH (10,92%), se explica por las altas temperaturas, así como a la presencia de bases como Ca y Mg. Guerra, 2015 indica que el pH de la cascarilla de arroz es básico, dando por resultado 7,14%, siendo los resultados de la

presente investigación 7,39%, esto indica que las condiciones de pirolisis fueron adecuadas (Figura 13).

En la presente investigación se observan los valores de la conductividad eléctrica, donde se muestra que el aumento de temperatura, disminuye el valor de conductividad eléctrica, resultando 1597 uS/cm para el biochar obtenido a 600°C y 808 uS/cm para el biochar obtenido a 900°C (Figura 14).

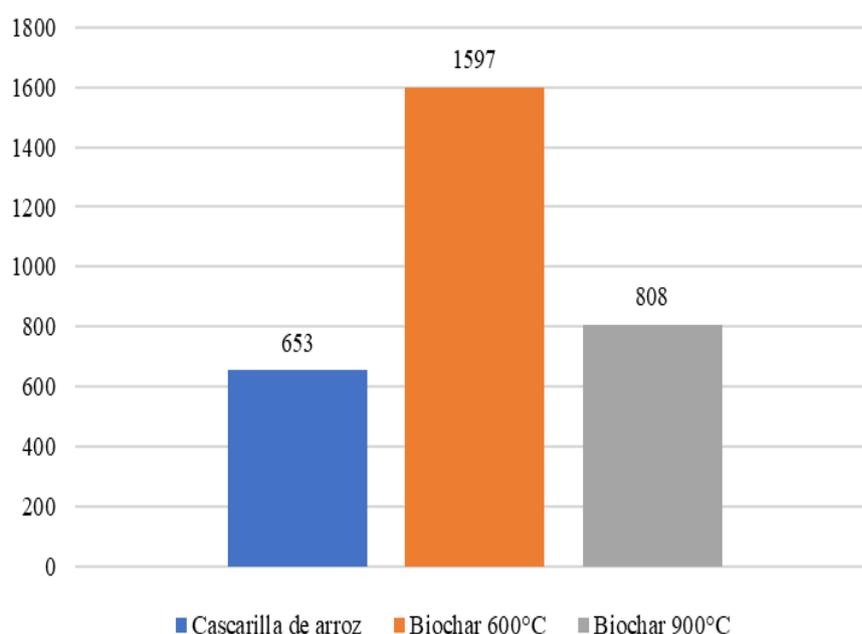


Figura 11, Variación de la C.E. (uS/cm) a 600 °C y 900 °C de la cascarilla de arroz.

Según lo expuesto por Guerra (2015), el comportamiento de la C.E. de la cascarilla de arroz puede explicarse por el contenido de cenizas de la cascarilla, siendo más probable que un alto contenido de cenizas eleve la C.E. El biochar de cascarilla de arroz, en cambio, presenta el comportamiento contrario, siendo el valor más bajo de C.E. (808 uS/cm) y el valor más alto de contenido de cenizas (85.1 %) para el biochar de cáscara de arroz obtenido a 600°C, y el valor más alto de CE (1597 uS/cm) y el valor más bajo de contenido de cenizas (66,7 %) para el biochar de cáscara de arroz obtenido a 900°C.

Los valores de pH y densidad aparente de la cascarilla de arroz (7,39 y 0,39 Kg/L) son similares a los valores reportados por Guerra (2015). Para la cascarilla de arroz (7,14 y 0,3

Kg/L). Sin embargo, la C.E. de la cascarilla de arroz para dicho estudio es el más bajo (252 uS/cm) mientras que para esta investigación el valor es más alto (653 uS/cm) (Figura 14).

Cuando las muestras de biochar se calentaron a distintas temperaturas, como se muestra en la Figura 15, los valores de densidad aparente variaron. El mayor valor de densidad aparente (0,46 kg/L) se produjo con el biochar de cáscara de arroz calentado a 600 °C, lo que se muestra en la Figura 15. Por otro lado, el biochar de cáscara de arroz producido a 900 °C tuvo el valor más bajo (0,43 Kg/L) de todas las muestras probadas (0,43 Kg/L).

Debido a que la densidad aparente del biochar aumenta gradualmente a medida que disminuye el nivel de pirólisis del biochar, las propiedades que lo distinguen como una enmienda potencial se vuelven menos atractivas, como se muestra en la Tabla 6, a medida que disminuye el nivel de pirólisis. Esto se debe a que el pH de la suspensión de biochar -agua disminuye y la conductividad eléctrica de la suspensión de biochar -agua aumenta, como se muestra en la Tabla 6.

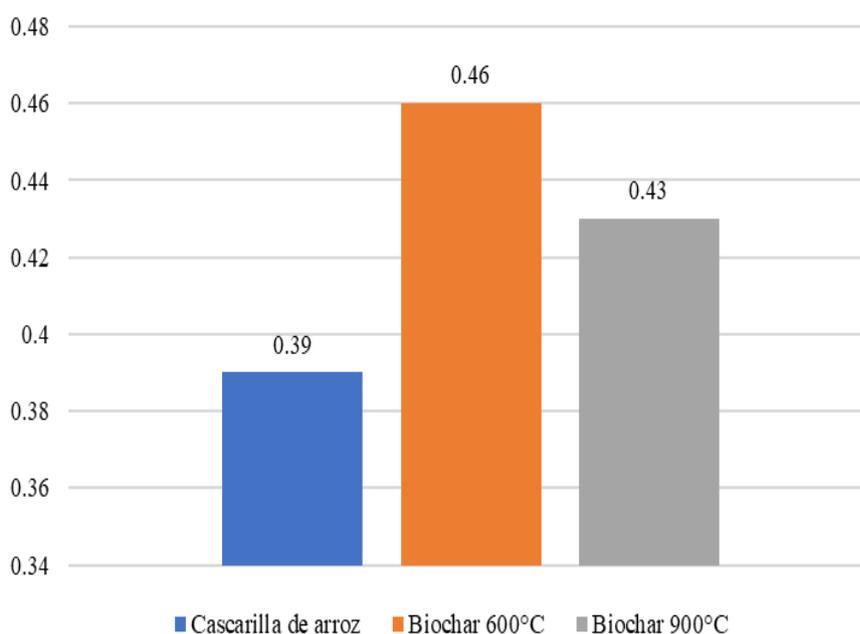


Figura 12, Variación de la densidad aparente (Kg/L) a 600 °C y 900 °C de la cascarilla de arroz.

En general, el biochar tiene una baja densidad aparente en comparación con otros materiales carbonosos. El biochar tiene una densidad media de 0,3 Mg m⁻³ de media, según McElligott et al. (2011), que es una de las características típicas del material. Es posible explicar

la baja densidad aparente del biocar por la naturaleza porosa del material, que tiene una elevada área superficial.

La biomasa (cáscara de arroz) tiene una densidad aparente de 0,39 kg/L. De lo anterior se deduce que su aplicación puede reducir la densidad aparente global del suelo, lo que supone un impacto beneficioso para el desarrollo de la gran mayoría de las plantas (Figura 15).

4.2.2. Análisis químico elemental

Muestra	C(%)	N(%)	H(%)	O(%)	S(%)	C/N(%)
Cascarilla de arroz	49,9	0,84	5,59	38,12	0,13	59,40
Biochar 600°C	19,5	0,45	-	-	-	43,33
Biochar 900°C	8,7	0,23	-	-	-	37,83

Tabla 6. Análisis químico elemental de la cascarilla de arroz y biochar a 600°C y 900°C.

Del análisis químico elemental de la cascarilla de arroz.

Del análisis químico elemental de la cascarilla de arroz, tabla 7. Se encontraron los valores promedio de 49,9% de carbono; 0,84% de Nitrógeno; 5,59% de Hidrógeno; 38,12% de Oxígeno; 0,13% de Azufre y 59,4% de relación carbono/nitrógeno.

Se ha descubierto que el biochar contiene una ligera deficiencia de nitrógeno en comparación con otros nutrientes térmicamente más estables. Esto se debe a que, durante el proceso de pirólisis, el calor generado hace que algunos nutrientes se volatilicen mientras que otros se concentran en el biochar resultante, dando lugar a una ligera deficiencia de nitrógeno (Guerra, 2015). La composición elemental encontrados en los resultados de Scientia (2007), indican los rangos de variabilidad encontrados a nivel mundial para cada elemento de la cascarilla de arroz, obteniendo un rango de 37,6 - 42,6% de carbono; 4,7 – 5,78% de Hidrógeno; 31,37 – 37,62% de Oxígeno; 0,38 – 1,88% de Nitrógeno; 0,01 – 0,18% de Azufre; los análisis de la cascarilla de arroz de la presente investigación están dentro de los rangos encontrados a nivel mundial a excepción del carbono y oxígeno que se encuentran por fuera, obteniendo valores de 49,9% de carbono; 0,84% de Nitrógeno; 5,59% de Hidrogeno; 38,12% de Oxígeno; 0,13% de Azufre. Debido a la alta proporción de elementos inorgánicos como el silicio en la

composición del biochar de cascarilla de arroz, éste tiene la menor concentración de nitrógeno de todos los biocarbones.

Del análisis químico elemental de biochar.

Del análisis químico elemental del biochar de la cascarilla de arroz, tabla 8. Se encontraron los valores promedio de carbono de 19,5% para el biochar de 600 °C y 8,7% para el biochar de 900 °C; un valor promedio de Nitrógeno de 0,45% para el biochar de 600 °C y 0,23% para el biochar de 900 °C; un valor promedio de Hidrógeno de 5,10% para el biochar de 600 °C y 4,70% para el biochar de 900 °C; un valor promedio de Oxígeno de 28,16% para el biochar de 600 °C y 29,13% para el biochar de 900 °C; un valor promedio de azufre de 0,10% para el biochar de 600 °C y 0,08% para el biochar de 900 °C. Finalmente la relación C/N obtuvo un valor de 43,33% para el biochar de 600 °C y de 37,83% para el biochar de 900°C.

En la figura 17. Del análisis químico elemental, se encontró un valor promedio de 19,5% de carbono a 600 °C observándose conforme aumenta la temperatura, disminuye el contenido de carbono llegando a un valor de 8,7% a 900°C de temperatura.

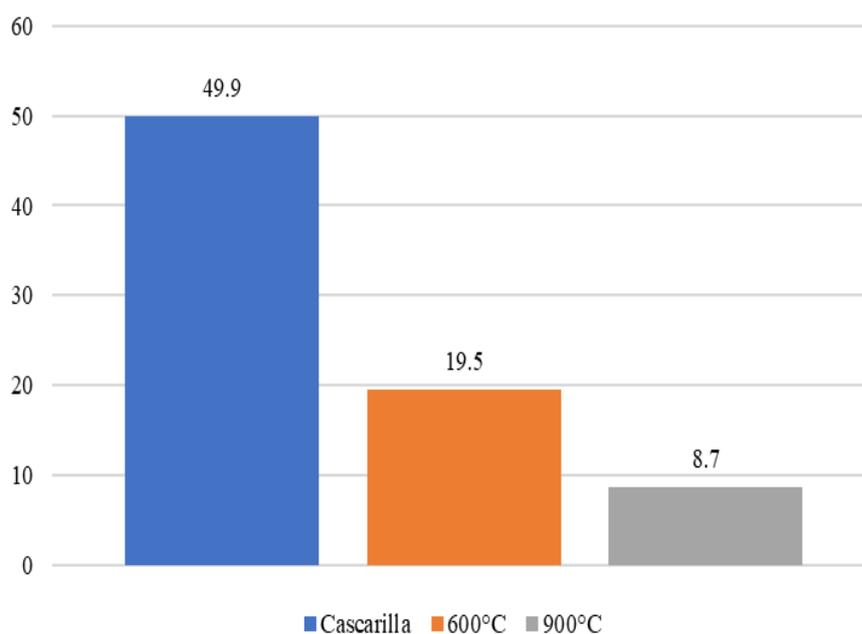


Figura 13, Variación del porcentaje de carbono a 600 °C y 900 °C.

Se observa la variación inversa del contenido del Nitrógeno respecto a la temperatura, conforme aumenta la temperatura, el contenido de Nitrógeno disminuye. Obteniendo así un valor del contenido de 0,45% de N para el biochar de 600 °C y un contenido de 0,25% de N para el biochar de 900 °C (Figura 18).

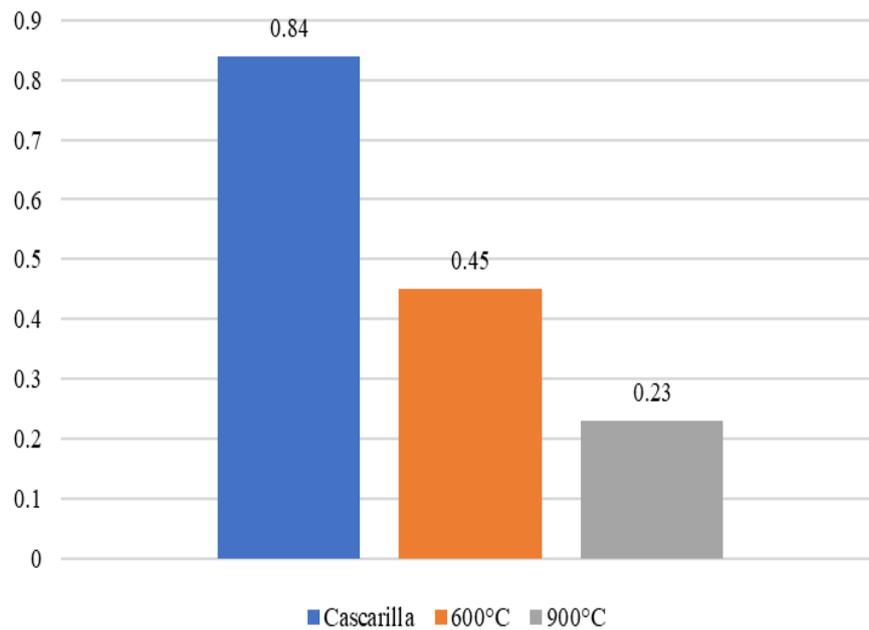


Figura 14. Variación del porcentaje de nitrógeno a 600 °C y 900 °C.

Se observa la variación inversa del contenido de la relación C/N respecto a la temperatura, conforme aumenta la temperatura, el contenido de la relación C/N disminuye. Obteniendo así un valor del contenido de 43,33% de C/N para el biochar de 600 °C y un contenido de 37,83% de C/N para el biochar de 900 °C (Figura 19).

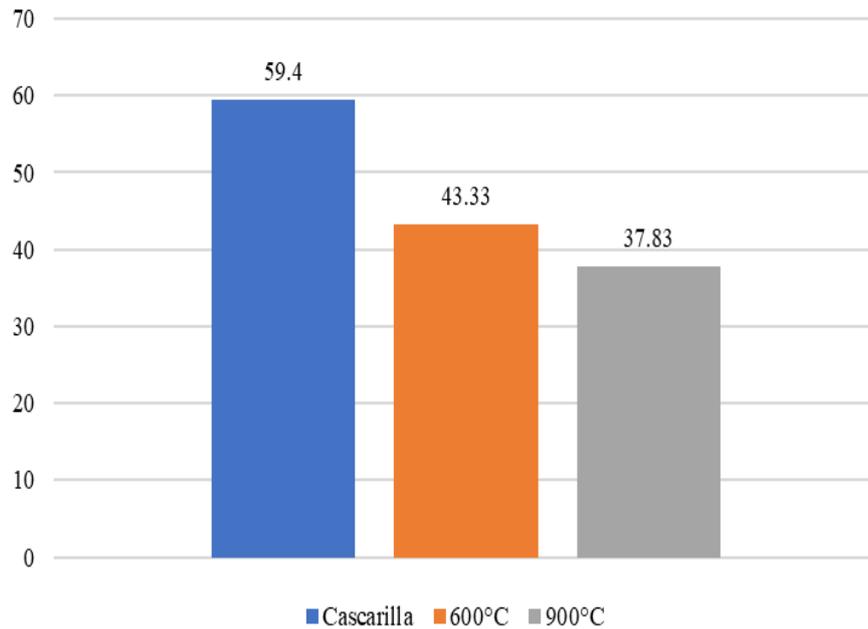


Figura 15, Variación del porcentaje de relación carbono/nitrógeno a 600 °C y 900 °C.

El último punto a mencionar es que el biochar es una sustancia pobre en nitrógeno con un alto contenido de carbono que produce una relación C/N alta y distinta. Según los resultados de Shenbagavalli y Mahimairaja (2012b), la relación C/N del biochar de cáscara de arroz oscila entre 51,4 y 96,8 en su investigación. Sin embargo, debido a los altos gastos del análisis elemental, el contenido de oxígeno e hidrógeno del biochar no pudo ser establecido para los propósitos de esta investigación (Figura 19).

4.2.3. Análisis termo gravimétrico

Tabla 7. Análisis Termo gravimétrico – TGA (Proximal) de la cascarilla de arroz y biochar.

Muestra	Humedad (%)	Material volátil (%)	Ceniza (%)
Cascarilla de arroz	10,11	86,00	14,00
Biochar 600°C	0,86	33,50	66,70
Biochar 900°C	0,06	15,00	85,10

Cascarilla de arroz

Se observa los resultados del análisis termo gravimétrico, obteniendo resultados de humedad (10,11%), material volátil (86,00%), y alto contenido de cenizas (14,00%).

El biochar tiene un bajo contenido de humedad, inferior al 10%, en comparación con la materia prima originaria. En general, el contenido de humedad del biochar viene determinado por las circunstancias en las que se manipula, almacena y transporta. La cantidad de agua contenida en el biochar, en cambio, vendrá determinada por la técnica que se utilice para su determinación. En esta investigación se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM, con la suposición de que la cantidad de masa de agua perdida es la única sustancia volátil a 105°C.

El contenido de material móvil contenido en el biochar, por otro lado, se refiere a la cantidad de material que se perderá como resultado de la volatilización, lixiviación y/o degradación microbiana (Figura 20).

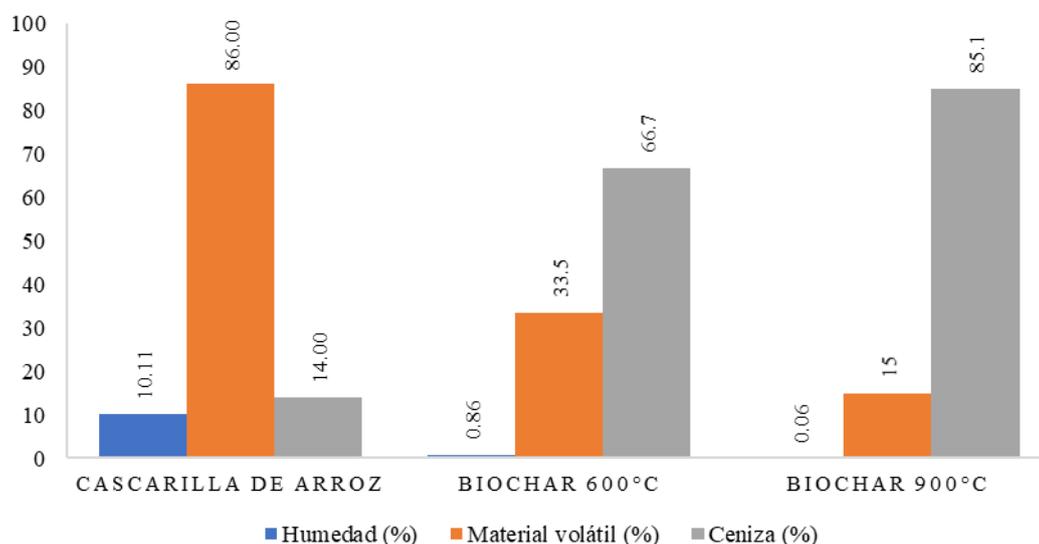


Figura 16, Variación del análisis termo gravimétrico de la cascarilla de arroz y biochar a 600°C y 900°C.

Biochar de la cascarilla de arroz

Se observa los resultados de la variación de la humedad del biochar de cascarilla de arroz a distintas temperaturas, a medida que incrementa la temperatura, el contenido de

humedad disminuye, obteniendo un valor de 0,86% de humedad para el biochar de 600 °C, y un valor de 0,06% de humedad para el biochar de 900 °C (Figura 21).

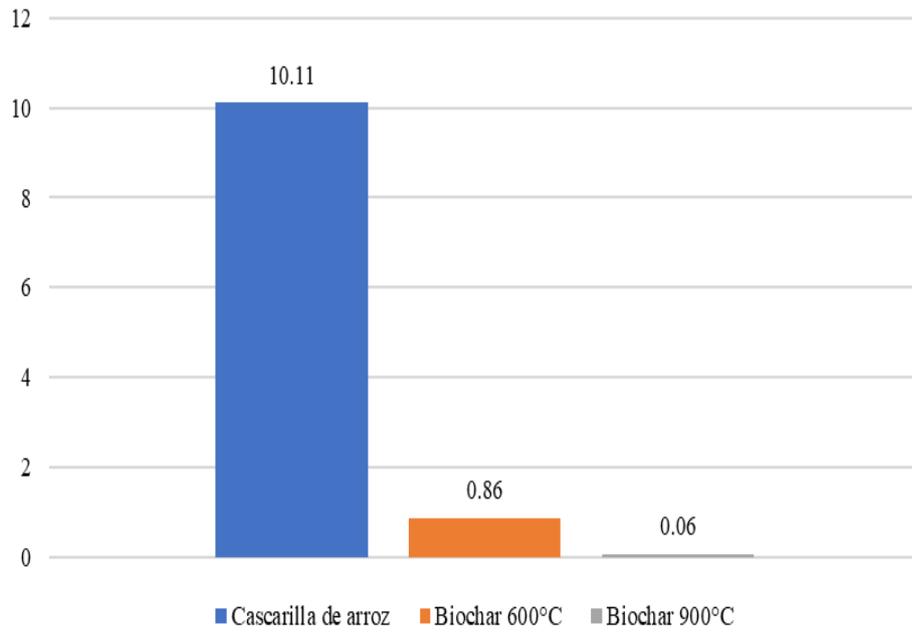


Figura 17, Variación del porcentaje de humedad a 600 °C y 900 °C.

Esto se ve respaldado por el hecho de que la cáscara de arroz utilizada en el estudio de Guerra (2015) tenía un contenido de humedad del 11,0%; mientras que la materia prima (cáscara de arroz) utilizada en la presente investigación tenía un contenido de humedad del 10,11%, lo que puede verificarse con Scientia (2007). Donde indica que el nivel de humedad de la cáscara de arroz fuera del desecador puede oscilar entre el 5 y el 40%, sin embargo, después de ser expuesta al medio ambiente, el contenido medio de humedad de la cáscara de arroz puede alcanzar aproximadamente entre el 8 y el 15% de humedad durante la temporada no lluviosa.

El contenido de humedad de la biomasa se define como la cantidad de agua contenida por kilogramo de materia seca dividida por la masa total de la biomasa. La biomasa debe tener un contenido de humedad inferior al 30% para poder ser utilizada en la mayoría de los procesos de conversión de energía. Es común que los residuos salgan del proceso de fabricación con un contenido de humedad mucho mayor que cuando entraron, lo que hace necesario realizar actividades de acondicionamiento antes de entrar en el proceso de pirólisis (Figura 21).

Se observa los resultados del material volátil a medida que incrementa la temperatura, disminuye la cantidad de material volátil debido a que estos se queman a mayor temperatura, obteniendo un valor de 33,5% de material volátil para el biochar de 600 °C, y un valor de 15% de material volátil para el biochar de 900 °C (Figura 22).

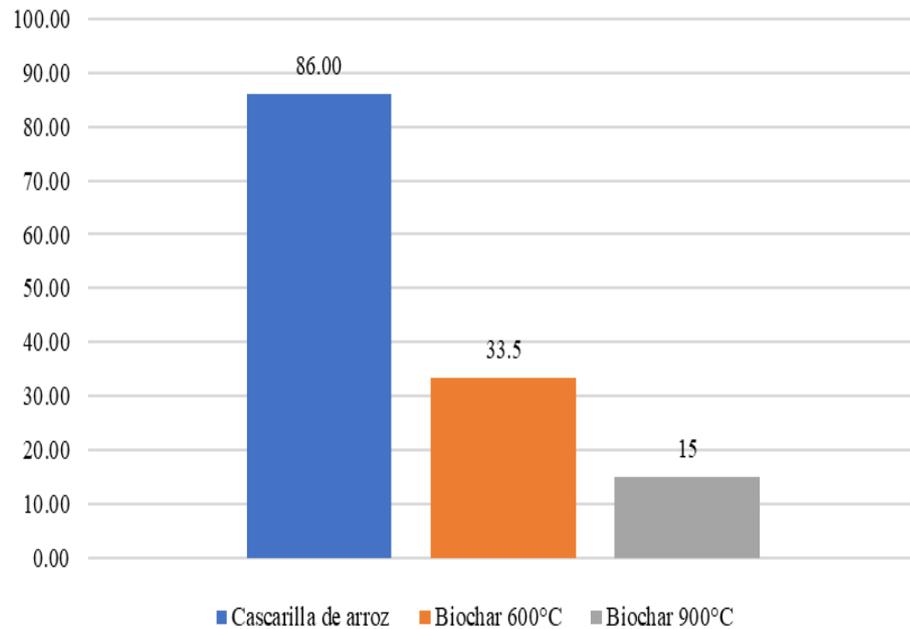


Figura 18, Variación del porcentaje de material volátil a 600 °C y 900 °C.

La cáscara de arroz tiene una importante concentración de materia volátil cuando se compara con el biochar producido a temperaturas de 600°C y 900°C, como puede verse en su análisis proximal. Según Scientia (2007), al investigar la cinética de la combustión de la cáscara de arroz, los resultados del análisis termogravimétrico revelan que las partículas sufren una importante pérdida de masa como resultado de la liberación y combustión de los compuestos volátiles en el rango de temperatura entre 200°C y 300°C (Figura 22).

Se observa los resultados del contenido de ceniza, donde a medida que incrementa la temperatura, aumenta la cantidad de ceniza, obteniendo un valor de 66,7% de contenido de ceniza para el biochar de 600 °C, y un valor de 85,1% de contenido de ceniza para el biochar de 900 °C (Figura 23).

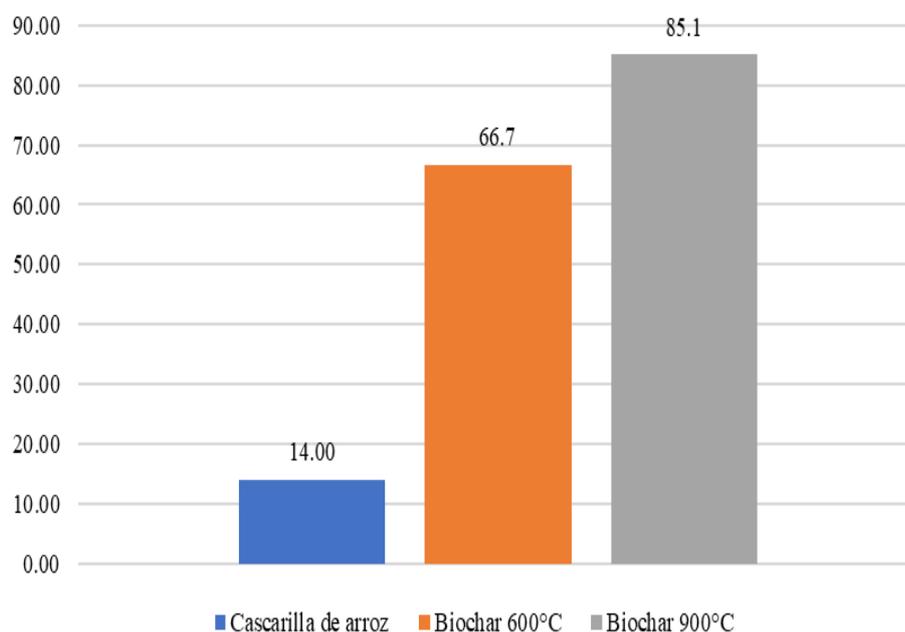


Figura 19, Variación del porcentaje de ceniza a 600 °C y 900 °C.

En la presente investigación se encontró un 14,0 % de contenido de cenizas en la cascarilla de arroz, comparando los resultados de la presente investigación con los de investigaciones anteriores en todo el mundo, según Scientia (2007), el rango del porcentaje de nivel de cenizas en la cascarilla de arroz varía entre 17,89 y 24,6 %, siendo Colombia el país que presenta el resultado más cercano con 17,89 %. Asimismo, se observa un alto porcentaje de cenizas (66,70 %) en el biochar producido a 600 °C, y un contenido de cenizas aún mayor (85,10 %) en el biochar producido a 900 °C. De acuerdo con la composición teórica de la cascarilla de arroz (Scientia, 2007), y por tanto del biochar resultante, este efecto podría deberse a la alta composición mineral y al contenido de silicio de la cascarilla de arroz, elemento que no se disocia al incinerar las muestras, demostrando que a medida que aumenta la temperatura de las muestras, disminuye el contenido de ceniza. La temperatura de calcinación alcanzada (900 °C) también dio lugar a que se observara una gran variedad de coloraciones en las cenizas de las muestras, todas las cuales indicaban la presencia de óxidos metálicos no identificables formados como resultado de la conversión de los hidróxidos y carbonatos alcalinos presentes en las muestras (Figura 23).

4.2.4. Poder Calórico

Observamos el Análisis del Poder Calórico de la cascarilla de arroz, con una cantidad de 3530,94 kCal/kg en condiciones de muestra seca a 105°C por 24 horas con el 05 a 10% de Humedad, según la Norma ASTM D5865 – 13.

Tabla 8. Análisis de Poder Calórico (Calorímetro) de la cascarilla de arroz.

Muestra	PCS (kCal/kg)
Cascarilla de arroz	3530,94

Según Scientia (2007), el valor calorífico de las plantas es directamente proporcional a la cantidad de humedad presente. Un alto contenido de humedad afecta a la eficiencia de la combustión porque una parte considerable del calor emitido se requiere para evaporar el agua y no se emplea en la reducción química de un material cuando hay un alto contenido de humedad.

La posición de Scientia es que (2007). La mayoría de los restos agrícolas tienen concentraciones significativas de óxidos de potasio (K₂O) debido al uso de fertilizantes en los cultivos agrícolas. En cuanto a los puntos de fusión, el K₂O es una buena opción, ya que tiene un punto de fusión bajo y, a medida que aumenta su proporción, el valor de la temperatura de fusión disminuye. La ceniza de cáscara de arroz, en cambio, se distingue por su baja concentración de óxidos de potasio (K₂O = 3,71%).

En cambio, la ceniza producida por la combustión de la cáscara de arroz tiene una alta concentración de óxidos de silicio (SiO₂ = 91,42 %). El punto de fusión del óxido de silicio es de 1450 °C, lo que es bastante alto.

A la luz de estas consideraciones, se espera que la quema de cáscara de arroz no cause problemas de escorificación debido al bajo punto de fusión de sus cenizas, que según algunos estudios es de unos 1500 °C.

Debido a que el poder calórico de la cascarilla de arroz está directamente relacionado con su contenido de humedad, los resultados de la investigación (Prada, 2010) muestran que tiene 3.281,6 kCal/kg con condiciones de muestra seca que contiene 8 % de humedad, que es similar a los resultados de la presente investigación, que muestran que tiene 3530,94 kCal/kg con condiciones de muestra seca que contiene 05 a 10% de humedad. Esto se debe a que el

poder calórico de la cáscara de arroz está directamente relacionado con su contenido de humedad. Un alto porcentaje de humedad reduce la eficacia de la combustión, ya que la mayor parte del calor emitido se utiliza para evaporar el agua y no se emplea en la reducción química de la muestra (Scientia, 2007, p. 1). (Tabla 11).

4.2.5. Análisis lignocelulósico

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis lignocelulósico realizado a la cascarilla de arroz.

En la tabla 12 se observa que el porcentaje de Holocelulosa (59,008%) es mayor que el porcentaje de celulosa (35,32%), mientras que el porcentaje de la hemicelulosa (23,688%) es menor que la celulosa y la lignina (31,105%).

Tabla 9. Análisis lignocelulósico de la cascarilla de arroz.

Biomasa	Lignina (%)	Holocelulosa (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Cascarilla de arroz	31,105	59,008	35,32	23,688

En la presente investigación se obtuvo el contenido promedio de 31,105% de lignina el cual se encuentra por encima de los rangos obtenidos a nivel mundial según Scientia,2007, que van desde los 18,20 – 24,6% (Figura 24).

El análisis de celulosa dio un valor promedio es de 35,32%, encontrándose dentro de los rangos obtenidos a nivel mundial del 25,89 – 35,3% de celulosa, siendo un valor cercano referente al encontrado (Figura 24).

También se analizó el valor promedio de la hemicelulosa resultando 23,688%, valores diferentes de los rangos obtenidos a nivel mundial que van desde 18,1 – 21,35%.

Analizando otro componente químico de gran importancia como es la holocelulosa se compararon con los resultados que obtuvo Loja (2017), donde obtuvo un 56% de holocelulosa en su cascarilla de arroz, semejante al porcentaje obtenido en la presente investigación del 59,008% en nuestra cascarilla de arroz (Figura 24).

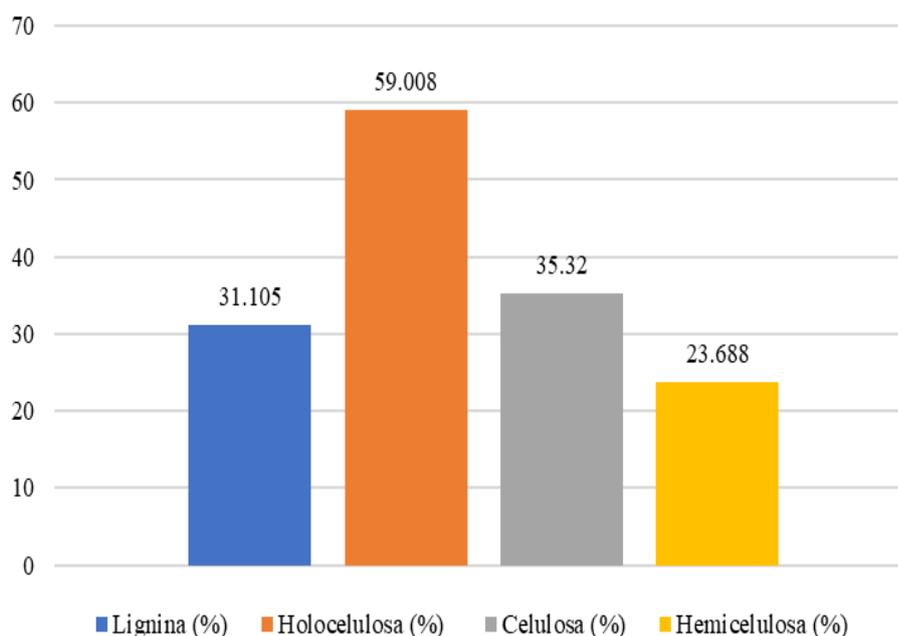


Figura 24, Análisis lignocelulósico de la cascarilla de arroz.

Como informa Scientia (2007), la cáscara de arroz tiene una mayor proporción de contenido de celulosa que otros productos agrícolas, lo que la convierte en una excelente contribución a su combustión, a la vez que sirve como componente principal de las fibras de este producto agrícola.

Tras ser expuesta a altas temperaturas, la lignina adquiere una característica de aglomeración en el biochar, lo que da lugar a la formación de una masa sólida difícil de romper (Scientia, 2007).

Muller et al. (2003) afirman que cuando la biomasa compuesta mayoritariamente por celulosa, hemicelulosa y lignina se somete a la descomposición térmica, se revelan dos zonas distintas, una relacionada con la ruptura de la celulosa y otra con la descomposición de la hemicelulosa. La descomposición inicial con pérdidas de masa que se produce a bajas temperaturas puede atribuirse al proceso de pirólisis de la hemicelulosa, mientras que la segunda descomposición con pérdidas de masa que se produce a temperaturas más altas puede atribuirse a la degradación de la celulosa. Por otro lado, este rango de temperaturas no muestra ninguna evidencia de pérdidas de masa debidas a la degradación de la lignina (Figura 24).

4.3. Determinar el nivel de toxicidad del biochar obtenido a partir de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) en *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga)

4.3.1. Bioensayos de la toxicidad de biochar de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) en *Daphnia magna* (pulga de agua)

Tabla 10. Nivel de toxicidad del biochar obtenido a 600° C y 900 °C, en *Daphnia magna* (pulga de agua).

T° de obtención	Nivel de toxicidad a diferentes concentraciones de solución de biochar						
	C(-)	6,25%	12,50%	25%	50%	75%	100%
600° C	10	9	9	10	9	10	-
900° C	6	9	9	9	9	-	8

Según el valor LC50 obtenido para los biochars, utilizando una dosis de biochar de 900 °C al 48,5%, se producirá la muerte del 50% del número de *Daphnia magna* (pulgas de agua), mientras que con el biochar de 600 °C, se producirá la muerte del 50% de *Daphnia magna* utilizando una dosis de 212.0%.

Tabla 11. Determinación del LC50 del Biochar.

Biochar	Ecuación	Valor de X a Y=5	LC50
600 °C	Y=2.1493X	2,326338808	212,0014386
900 °C	Y=2,9648X	1,686454398	48,57965187

Si expresamos los valores de LC50 obtenidos en mg/L, tendríamos una concentración de 2120000 mg/L para el biochar de 600°C y 485000 mg/L para el biochar de 900°C (Figura 25).

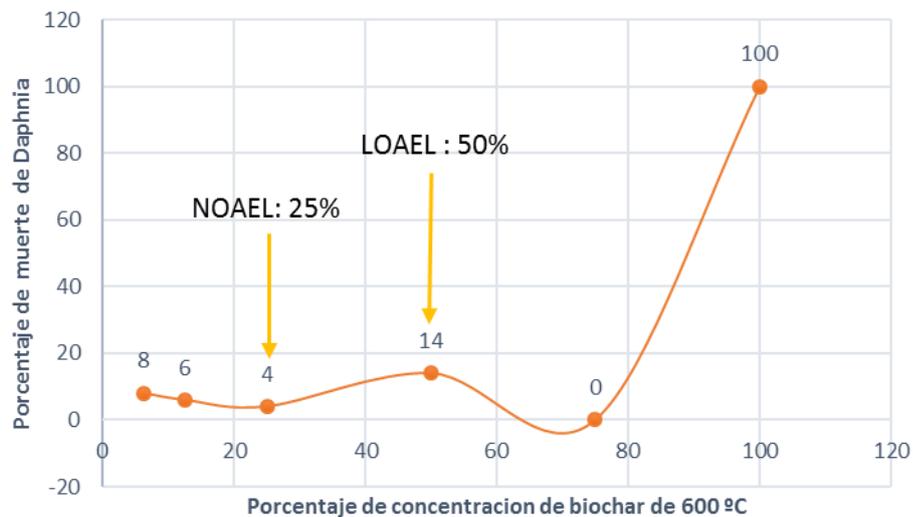


Figura 20, Porcentaje de muerte de *Daphnia* vs porcentaje de concentración de biochar de 600°C.

(La Figura 25 muestra que la concentración de ibuprofeno que provocó la muerte del 50% de *Artemia salina* nauplii en el estadio II-III durante un periodo de exposición de 24 horas CL 50-24h fue de 17,386 mg L⁻¹) (Saetama et al., 2018).

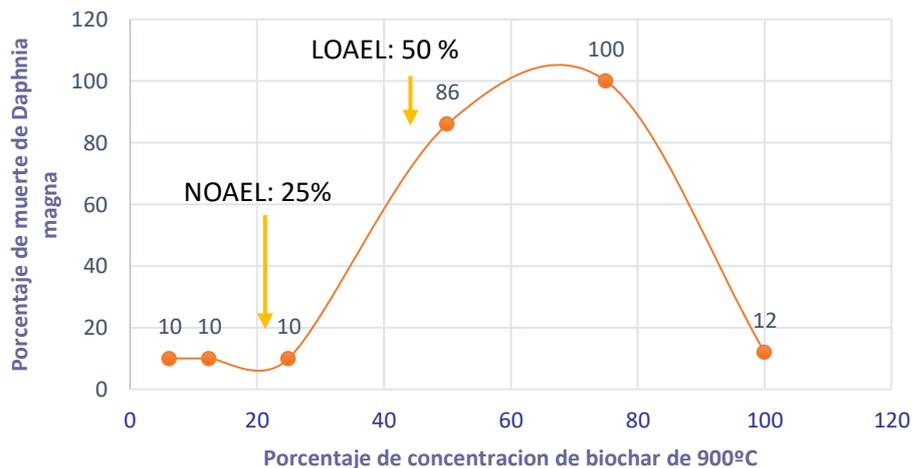


Figura 21, Porcentaje de muerte de *Daphnia magna* vs porcentaje de biochar de 900°C.

De la evaluación de la toxicidad, el valor del LOAEL se observa que con la solución al 50% de biochar de 600°C, se produce la muerte del 14% de pulgas de agua, mientras que para el biochar de 900°C, se produce la muerte del 86% de las pulgas de agua. Para los valores de NOAEL, se observó que con la solución al 25% del biochar de 600°C, se produce la muerte

de 4% de las pulgas de agua, mientras que con la solución al 25% del biochar de 900°C se produce la muerte del 10% de las pulgas de agua (Figura 25).

Según los valores LC50 obtenido para los biochars, utilizando una dosis de biochar de 900°C al 48,5%, se producirá la muerte del 50% del número de pulgas de agua *Daphnia magna*, mientras que con el biochar de 600°C, se producirá la muerte del 50% de las pulgas de agua *Daphnia magna* utilizando una dosis de 212% (Figura 25 y 26).

A una concentración de 20 mgL⁻¹ de ibuprofeno, se produjo el mayor porcentaje de muerte en nauplios de Artemia, que es comparable al 63,3% de mortalidad, lo que proporciona evidencia de que si hay efectos de toxicidad aguda con el ibuprofeno, es probable que sean graves (Saetama et al., 2018).

En los resultados de toxicidad de *D. magna*, por efectos de nanopartículas de Zn (40-60 nm) se puede decir que tienen un alto efecto tóxico solo a una concentración de 50 ppm durante 48 horas y se puede aceptar una dosis letal a partir del 5 ppm al final de las 72 horas. En los individuos de *A. salina*, se ve claramente que hay un aumento en la mortalidad en organismos, paralela al aumento de la dosis (Danabas et al., 2019).

Aunque la investigación, no se trabajó en el efecto del tamaño de partícula de biochar, es importante mencionar, que Danabas et al. (2019), mencionan claramente que existe una proporción inversa entre el tamaño de las nanopartículas y el efecto tóxico es decir cuanto menor sea el tamaño de las nanopartículas.

4.3.1. Bioensayos de la toxicidad de biochar de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) en *Lactuca sativa* (lechuga)

Tabla 12. Índice de elongación promedio de semillas de *Lactuca sativa* a concentraciones de solución de biochar.

Tratamiento	Índice de elongación promedio de semillas de <i>Lactuca sativa</i> a concentraciones de solución de biochar						
	C(-)	6,25%	12,50%	25%	50%	75%	100%
600°C	0,69	0,5	0,68	0,16	-0,32	0,04	-0,4
900°C	0,75	0,41	0,04	0,04	0,05	-0,09	-0,32

Se observa una elongación creciente hasta la concentración de 12,5% con el biochar obtenido a 600°C, mientras que a la concentración de 50% la elongación se detiene. Para el caso del biochar de 900°C, únicamente se observó elongación a la concentración de 6,25%, en las siguientes concentraciones, la elongación es despreciable, mostrando paralización a partir de la concentración de 75% (Figura 27).

Respecto a la evaluación de la elongación, se observó un efecto creciente hasta la concentración de 12,5% con el biochar obtenido a 600 °C, mientras que a la concentración de 50% la elongación se detiene. Para el caso del biochar de 900 °C, únicamente se observó elongación a la concentración de 6,25%, en las siguientes concentraciones, la elongación es despreciable, mostrando paralización a partir de la concentración de 75%. De estos resultados podemos afirmar que existe un efecto fitotóxico desarrollado por el metabolismo de la especie evaluada, ante la presencia de biochar obtenidos a diferentes temperaturas, siendo el biochar de 900 °C el de mayor efecto, por la concentración de compuestos químicos liberados producto del pirólisis que incrementaría en forma directa a la temperatura aplicada (Figura 27).

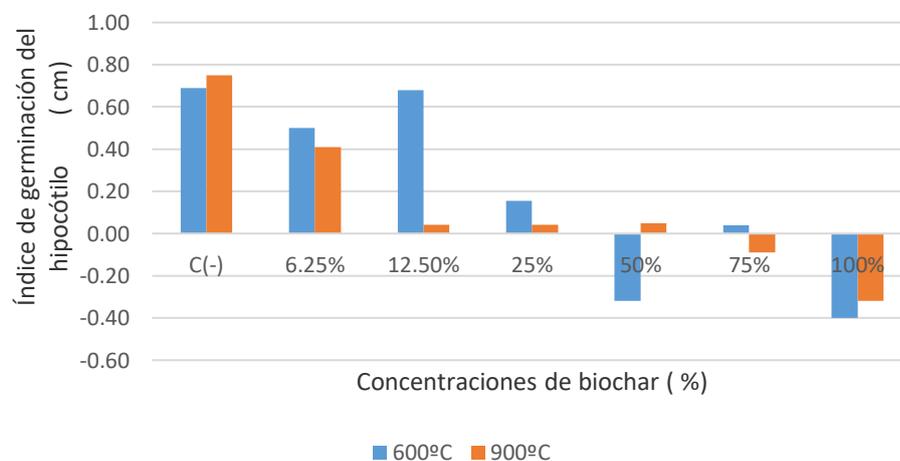


Figura 22, Elongación promedio vs concentraciones de solución de biochar.

Nakai et al. (2000), menciona que las plantas poseen algunas funciones ecológicas productos del metabolismo secundario que son importantes para ellas en su defensa contra patógenos, la herbivoría de vertebrados e invertebrados e incluso algunos se consideran inhibidores del crecimiento del fitoplancton. Por otro lado, Gross et al. (2003) afirman que existen una serie de compuestos activos en diferentes macrófitas, la mayoría de éstos aún no están identificados.

Los compuestos fenólicos, clasificados ampliamente en varios grupos; entre ellos están los fenoles simples y ácidos fenólicos, han demostrado actividad algicida y son responsables de las interacciones alelopáticas desarrolladas en los sistemas acuáticos (D'abrosca et al., 2006).

Los ácidos como el gálico, elágico y pirogálico se han identificado como polifenoles responsables de la actividad algicida de *Myriophyllum spicatum* Linnaeus sobre cianobacterias y algas verdes (Nakai et al., 2000).

Gopal y Goel (1993) y Gross (1999) atribuyen que este tipo de compuestos producen efectos tanto benéficos como perjudiciales que influyen sobre el crecimiento y desarrollo de los sistemas biológicos, por tanto, se consideran aleloquímicos que pueden constituir una estrategia adaptativa de algunas especies.

V. CONCLUSIONES

1. El biochar obtenido de la cascarilla de *Oryza sativa* (arroz) a 600 °C presentó un efecto menos tóxico, que el obtenido a 900 °C sobre *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga).
2. El rendimiento del biochar varía en función al contenido de temperatura y humedad, obteniendo el mayor rendimiento de 84.419% a 600 °C.
3. El biochar de cascarilla de arroz obtenido a 600 °C, a comparación del biochar obtenido a 90°C, tuvo una mejor concentración elemental que la materia prima original, a excepción de los nutrientes, y alta conductividad eléctrica las cuales le otorgan mejores condiciones para la transformación de suelos y condiciones óptimas para los bioensayos.
4. A mayor temperatura de obtención de biochar, el efecto tóxico es mayor, en la prueba con *Daphnia magna*, una solución al 50% del biochar de 900 °C, superó en 72%, el número de muertes de individuos, que el generado por la solución al 50% del biochar de 600 °C, con respecto a la elongación de las semillas germinadas de *Lactuca sativa*, con el biochar obtenido a 600 °C, las raíces de las semillas se detiene cuando la concentración es de 50%, para el biochar a 900°C la elongación de las semillas germinadas se detiene a partir de la concentración de 75%.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar pruebas de biochar con aguas de diferentes calidades para evaluar las ventajas y desventajas de su uso en medio acuoso, con referencia a su uso en suelos.
2. Realizar el análisis complementario de la caracterización mineralógica del biochar de la cascarilla de arroz para conocer el comportamiento de estas respecto a la variación de temperatura.
3. Desarrollar criterios estandarizados para el examen de las propiedades fundamentales del biochar, dado que se están considerando múltiples enfoques adaptados a cada investigación.
4. Realizar los ensayos de toxicidad en otras especies de plantas para tener mayor data de información.
5. Realizar el proceso de adsorción de las Isotermas de Langmuir y freundlich de los elementos del cadmio y plomo con el biochar de la cascarilla de arroz para determinar la adsorción atómica de estos elementos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenza, D. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta*. Barcelona: Bellaterra.
- APHA (Asociación Americana de Salud Pública). 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. (Asociación de la Salud Pública Americana). Díaz de Santos S.A. Madrid, España. s.p.
- Ayers, R., Westcot, D. (1985). *Calidad del agua en la Agricultura*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Estados Unidos. 186 p.
- Benacchio, S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano*. FONAIAP. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.
- Castillo, G. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. 1ra edición. Edit. Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. México. 189 p.
- Castro, G. (2013). Dependencia de la dosis en los mecanismos de toxicidad y la evaluación de riego en toxicología. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 47(3):561 – 585.
- Chan, K. Y., Xu, Z. H. (2009). Biochar: Nutrient properties and their enhancement. J. Lehmann and S. Joseph (eds.). *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan, UK. 67-84 p.
- Chen, D., Xinzhi, Y., Chao, C., Pang, X., Huang, J., Li, Y. (2016). Effect of biochar temperature on chemical oxidation stability of bamboo biochar. *Bio resource Technology*, 218:1303 – 1306.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Engelhard, M. H. (2008). Natural oxidation of black carbon in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim. Cosmochim.*, 72:1598-1610.
- Cueva, M., León, J., Fukusaki, Y. (2010). *Manual de laboratorio de química orgánica*. 2da Edición. Edit. Gutemberg Editores – Impresores E.I.R.L. Lima, Perú. 127 p.

- D'abroscab, B., Dellagrecia, M., Fiorentino, A., Isidori, M., Monaco, P., Pacifico, S. (2006). Chemical constituents of the aquatic plant *Schoenoplectus lacustris*: evaluation of phytotoxic effects on the green alga *Selenastrum capricornutum*. *Journal of Chemical Ecology*, 32:81-96. DOI:[10.1007/s10886-006-9354-y](https://doi.org/10.1007/s10886-006-9354-y)
- Danabas, D., Ates, M., Ertit, B., Canan, I., Unal, I., Aksu, O., Kutlu, B. (2019). Effects of Zn and ZnO Nanoparticles on *Artemia salina* and *Daphnia magna* Organisms: Toxicity, Accumulation and Elimination, *Science of the Total Environment* doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134869>
- Díaz, M., Pica, Y., Ronco, A. (s.d.). *Ensayo de toxicidad aguda con el cladóceros Daphnia magna. Ensayos para agua dulce:* [En línea] <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/573/cap1.pdf>.
- Dodson, S., Hanazato, T. (1995). Commentary on effects of anthropogenic and natural organic chemicals on development, swimming behavior, and reproduction of *Daphnia*, a key member of aquatic ecosystems. *Environ. Health. Perspect*, 103 (Suppl 4):7-11
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. (2009). *Physical properties of biochar*. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.), Earthscan.
- Ebert, D. (2005). *Ecology, Epidemiology and Evolution of Parasitism in Daphnia*. Universität Basel: Switzerland: [Fecha de acceso: 1 de Junio de 2020] URL:<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=Books>.
- Ferrando, M., Sancho, E., Andre-Moliner, E. (1999). Toxicity studies of tetradifon to *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and Environmental Restoration*, 2(1):14-18.
- Giaconi, V., Escaff, M. (2004). *Cultivo de hortalizas*. 15ta Edición. Editorial Salesianos S.A. Santiago de Chile, Chile. 336 p.
- Gopal, B., Goel, U. (1993). *Competition and allelopathy in aquatic plant communities*. *Botanical Reviews* 59: 155-210. DOI:[10.1007/BF02856599](https://doi.org/10.1007/BF02856599)
- Gross, E., Meyer, H., Schilling, G. (2003). Release and ecological impact of algicidal hydrolysable polyphenols in *Myriophyllum spicatum*. *Phytochemistry*, 41:133-138. DOI:[10.1016/0031-9422\(95\)00598-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(95)00598-6).

- Hader, D., Erzinger, G. (2015). Monitorreo de la contaminación y sustancias tóxicas en ecosistemas acuáticos. *Revista Ecológica y Environmental Sciences*, ISSN: 2347 – 7830.
- Hammes, K., Smernick, R. J., Skjemstad, J. O., Herzog, A., Vogt, U., Schmidt, M. V. I. (2006). Synthesis and characterization of laboratory-charred grass straw (*Oriza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Org. Geochem*, 37:1629-1633 p.
- IBI (International Biochar Initiative). (2012). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil*. www.biochar-international.org. Document reference code: IBI-STD-01.
- IBI (International Biochar Initiative). (2015). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*. disponible http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf, revisado el 3 de nov. 2017.
- IIA (Instituto de Investigaciones del Arroz). (2001). Instituto técnico del Arroz (Segunda emisión). La Habana, Cuba.
- Kishimoto, S., Sugiura, G. (1985). Charcoal as soil conditioner. *Int. Achieve. Future*, 5:12-23.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5:381-387.
- Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D., Sohi, S. (2009). Stability of biochar in the soil. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.) Earthscan.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Sterling, London, Earthscan. 1-9 p.
- Lopez, M., Grau, M. (2005). *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de la capa superficial de los suelos agrícolas y de los pastos de la España peninsular*. II Resultados por Provincias. Ministerio de Educación y Ciencia e Instituto Nacional de Tecnología Agraria y Alimentaria.

- Maienza, A., Baronti, S., Genesio, L., Vaccari, F. P., Miglietta, F. (2016) *Biochar una soluzione sostenibile per agricoltura ed ambiente*. Istituto di Biometrologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze. Edizione.
- Major, J. (2010). *Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems*. International Biochar Initiative. www.biocharinternational.org.
- Major, J. (2011). *Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more*. A literature review. <http://biochar-atlantic.org/assets/pdf/BiocharSoilFertility.pdf>.
- Martínez, M. L., Torres, M. M., Guzmán, C. A., Maestri, D. M., (2006). Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. *Industrial crops and products*, 23:23-28.
- Mašek, O., Brownsort, P. (2011). *Biochar Production*. In: S. Shackley and S. Sohi (eds.). An Assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. UK Biochar Research Centre. UK. 37-44 p.
- Mateo Marín, N. (2013). *Evaluación de la capacidad de secuestro de carbono en dos suelos del valle del Ebro mediante la aplicación de biochar: estabilidad de la materia orgánica*. [Tesis Pregrado, Universidad de Zaragoza]: <https://zaguan.unizar.es/record/11159?ln=es#>
- McLaughlin, H., Anderson, P. S., Shields, F. E., Reed, T. B. (2009). *All biochars are not created equal, and how to tell them apart*. North American Biochar Conference. Boulder, <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct2009>.
- Muller, M., Bockhorn, H., Krebs, L., Muller, U. (2003). *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 68-231 p.
- Nakai, S., Inoue, Y., Hosomi, M., Murakami, A. (2000). *Myriophyllum spicatum released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae Microcystis aeruginosa*. *Water Research* 34: 3026-3032. DOI:10.1016/S0043-1354(00)00039-7
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D. W., Busscher, W. J., Schomberg, H. (2009). Characterization of designer

- biochar produced at different temperatures and their effects on a loamysand. *Ann. Environ. Sci*, 3:195-206.
- Núñez, M., Hurtado, J. (2005). Bioensayos de toxicidad aguda utilizado *Daphnia magna* Straus (Cladocera: Daphniidae) desarrollada en medio de cultivo modificado. *Revista Peruana de Biología*, 12(1):165 – 170.
- Oses Orbegozo, A. (2012). Efectos de la aplicación de biochar en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas. [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma de Barcelona]: <https://core.ac.uk/reader/18416021>
- Ospina, V. M., Buitrago, R., López, D. P. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *Tecno Lógicas*, 17(32):75-84.
- Pastor, J., Valenzuela, C., Bernalte, A., Gómez, V. 1993. Characterization study of char and activated carbon prepared from raw and extracted rockrose. *Carbon*, 31:1061-1069.
- Persoone, G., Baudo, R., Cotman, M., Blaise, K., Trhompson, C., Moreira, M., Vollat, B., Han, T. (2009). Revisión de la prueba de toxicidad aguda por *Daphnia magna*: evaluación de la sensibilidad y la precisión de los ensayos realizados con organismos de cultivos de laboratorio o eclosionados a partir de huevos inactivos, conocimiento y manejo de ecosistemas acuáticos Estados Unidos, 393(1):33-50.
- Plaza, G., Nalecz, G., Ulf, K., Brigmon, R. L. (2005). The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation. *Chemosphere*, 59:289-296.
- Rodriguez de Moraes, P., Dobreff, J., Gunnar, L. (2014). The plants by Daniel Rolander in *Diarium surinamicum* (1754–1765) and herbaria. *Phytotaxa*, 165(1):001–101.
- Rottmann, R., Graves, J., Watson, C., Yanong, R. (2003). *Culture Techniques of Moina: The Ideal Daphnia for Feeding to Freshwater Fish Fry*. University of Florida; [Fecha de acceso: 1 de Agosto de 2020]: URL:<http://edis.ifas.ufl.edu/FA024>.
- Rouquerol, F., Rouquerol, I., Sing, K. (1999). *Adsorption by powders and porous solids*. Academic Press. ISBN: 978-0-12- 598920-6. London, UK.
- Saavedra, G., Corradini, F., Antunez, A., Felmer, S., Estay, P., Sepulveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga*, Boletín INIA N°49, Santiago, Chile.

- Saetama, V., Vera, L., Vanegas, M. E., Cruzat, C., Brazales, D. (2018). Evaluación toxicológica de soluciones acuosas de ibuprofeno mediante bioensayos con *Artemia salina*, *Allium schoenoprasum* L y *Lactuca sativa*, *Rev. Toxicol* (2018) 35: 112 – 118.
- Schaczenski, J. (2010). *Biochar and Sustainable Agriculture*. In: H. Michels (ed.). National Sustainable Agriculture Information Service. 1-12 p.
- Shenbagavalli, S., Mahimairaja, S. (2012). Characterization and effect of biochar on Nitrogen and Carbon dynamics in soil. *International Journal of Advanced Biological Research*, 2:249–255.
- Shrestha, G., Traina, S. J., Swanston, C. W. (2010). Black carbon's properties and role in the environment: *A comprehensive review*. *Sustainability*, 2:294-320.
- Sobrero, M., Ronco, A. (2004). *Ensayo de Toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L*. 55-77p.
- Trujillo, E., Valencia, C. E., Alegría, M. C., Honorata, A., Flor, M. (2019). Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas, *Rev Soc Quím Perú*. 85(4):489-503.
- Tumminelli, D. (2011). *Proprietà nutritive del biochar e risposte delle colture prodotte*. Universidad di Studi di Palermo. Italia. Pdf. 93 p.
- Verheijen, F. G. A., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van Der Velde, M., Dias, I. (2009b). *Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 149 p.
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., Smith, C. J. (2009a). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1-4):23-38.
- Wolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., Joseph, S. (2010). *Sustainable biochar to mitigate global climate change*. *Nat. Commun.* 1-56 p.
- Yuste, P. (1997). *Horticultura*. Biblioteca de la agricultura. Idea Books. Barcelona, España. 531 – 768 p.

Zheng, W., Sharma, B., Rajagopalan, N. (2010). *Using Biochar as a Soil Amendment for Sustainable Agriculture*. Illinois: Illinois Department of Agriculture Sustainable Agriculture Grant's Research Report Series.

ANEXOS

A. Tablas de resultados del biochar a 600°C y 900°C

600°							
	c (-)	6.25	12.50	25	50	75	100
R1	9	7	9	10	9	10	-
R2	10	10	8	10	7	10	-
R3	10	10	10	10	9	10	-
R4	10	9	10	8	8	10	-
R5	10	10	10	10	10	10	-

Tabla 16. Nivel de toxicidad del biochar a 600°C probado en *Daphnia magna* probado en soluciones a diferentes porcentajes de concentración.

900°							
	c (-)	6.25	12.50	25	50	75	100
R1	7	10	9	8	10	-	10
R2	7	10	7	9	10	-	3
R3	3	9	10	10	7	-	9
R4	7	8	10	8	9	-	9
R5	6	8	9	10	7	-	8

Tabla 13. Nivel de toxicidad del biochar a 900°C probado en *Daphnia magna* probado en solución de diferentes porcentajes de concentración.

c (-)	1	2	3	4	5
R1	3.0	2.3	2.8	2.3	2.0
T1	1.8	1.5	1.8	1.5	1.9
R2	3.3	2.9	3.5	1.9	2.0
T2	2.0	1.9	1.4	1.2	1.1
R3	1.7	2.5	2.4	1.5	2.4
T3	1.6	1.6	1.5	1.3	1.5
R4	1.5	2.4	2.0	2.4	1.8
T4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.4

R5	3.0	2.6	3.1	1.4	1.7
T5	2.1	1.7	1.4	1.4	1.2
R6	2.3	2.5	2.8	1.2	2.0
T6	1.8	1.6	1.8	1.4	1.5
R7	2.9	2.3	2.2	1.7	1.9
T7	1.8	1.2	1.5	1.3	1.5
R8	2.8	2.3	2.7	0.8	2.4
T8	1.9	1.0	1.5	0.7	1.4
R9	0.5	1.5	2.9	0.9	1.5
T9	0.3	1.2	1.6	0.9	1.2
R10	0.5	2.3	-	-	1.6
T10	0.2	1.5	-	-	1.2
6.25	1	2	3	4	5
R1	2.2	2.7	1.7	2.9	2.1
T1	1.4	1.9	1.6	2.1	1.2
R2	2.0	2.9	2.2	2.6	3.4
T2	1.6	2.0	1.4	1.8	1.7
R3	2.8	2.0	2.7	2.8	1.2
T3	1.6	1.4	1.7	1.8	1.5
R4	2.0	1.9	2.4	2.6	2.2
T4	1.5	1.3	1.3	1.7	2.2
R5	1.5	1.5	2.5	2.6	1.7
T5	1.2	1.2	1.4	1.9	1.4
R6	1.7	1.4	2.0	1.9	2.0
T6	1.5	1.5	1.9	1.7	1.6
R7	2.5	2.2	1.5	3.0	1.5
T7	1.5	1.7	1.3	1.8	1.4
R8	1.7	2.5	1.7	2.0	0.9
T8	1.7	1.5	1.5	1.7	0.7
R9	2.0	1.5	0.5	2.5	0.6
T9	1.6	1.0	0.6	2.0	0.3

R10	-	0.9	0.3	0.2	-
T10	-	0.7	0.1	0.1	-
12.50	1	2	3	4	5
R1	2.0	2.8	1.8	2.5	3.2
T1	1.7	2.3	1.8	2.0	2.3
R2	3.0	2.6	1.9	2.0	2.3
T2	2.0	2.2	2.0	1.6	2.4
R3	2.8	1.9	2.0	2.9	3.4
T3	2.0	2.2	2.0	2.0	2.3
R4	2.4	2.1	2.0	2.8	3.5
T4	1.8	1.5	2.0	1.7	2.1
R5	1.9	2.2	2.0	2.2	1.8
T5	1.8	1.8	1.9	1.7	1.6
R6	1.9	2.5	2.0	2.2	2.1
T6	1.5	2.1	1.4	2.2	1.7
R7	1.8	1.7	1.8	2.5	2.3
T7	1.5	1.6	1.9	1.9	1.5
R8	1.5	2.0	0.7	2.2	19.0
T8	1.4	1.6	0.7	1.6	1.8
R9	0.1	-	0.2	2.2	2.3
T9	0.1	-	0.2	1.5	1.8
R10	-	-	0.1	0.3	-
T10	-	-	0.2	0.4	-
12.50	1	2	3	4	5
R1	2.0	3.0	2.2	1.7	2.6
T1	2.2	2.4	2.5	1.6	2.2
R2	2.3	2.5	1.9	3.2	1.9
T2	2.3	2.2	1.9	2.2	1.7
R3	2.0	1.8	2.0	2.2	1.6
T3	1.6	1.9	1.8	2.0	1.6
R4	1.4	2.0	2.8	3.0	2.5

T4	1.9	2.4	2.3	2.5	2.2
R5	1.8	2.9	1.1	2.5	2.0
T5	1.5	2.4	1.4	1.9	2.0
R6	2.2	1.9	2.0	3.0	1.8
T6	1.7	1.7	1.6	2.3	2.0
R7	1.9	0.3	1.9	1.6	1.6
T7	1.4	0.2	1.9	1.9	1.2
R8	1.5	0.2	1.7	1.7	1.6
T8	1.6	0.2	1.7	1.8	1.5
R9	0.2	-	1.8	2.3	1.4
T9	0.3	-	1.7	2.1	1.2
R10	-	-	-	-	-
T10	-	-	-	-	-
50	1	2	3	4	5
R1	2.9	1.4	2.4	2.5	2.0
T1	2.4	1.7	2.4	2.4	1.9
R2	2.1	1.5	1.7	2.2	1.2
T2	2.4	2.0	2.4	2.8	2.2
R3	2.3	1.5	1.5	1.5	2.0
T3	2.1	2.0	2.5	2.0	1.8
R4	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5
T4	2.4	2.1	1.8	1.9	1.9
R5	1.8	1.6	2.0	1.5	1.4
T5	2.0	2.3	2.3	1.9	1.8
R6	1.6	1.5	1.7	2.0	1.4
T6	2.3	1.8	2.2	2.2	1.9
R7	1.5	1.4	1.8	1.9	1.6
T7	2.0	2.3	2.3	2.6	1.3
R8	1.9	1.1	1.0	2.0	1.4
T8	2.2	1.3	2.1	2.6	1.8
R9	2.6	1.4	1.4	1.8	1.8

T9	2.2	1.8	2.1	1.6	1.7
R10	-	-	-	-	1.9
T10	-	-	-	-	2.0
75	1	2	3	4	5
R1	2.6	1.8	2.2	1.8	2.7
T1	2.6	1.7	2.6	2.7	2.7
R2	3.0	2.3	2.0	2.0	1.7
T2	2.8	2.5	2.6	2.2	2.0
R3	2.3	1.7	1.6	3.4	2.4
T3	2.3	1.5	1.8	3.0	1.6
R4	1.8	2.0	2.1	1.8	1.5
T4	1.5	1.6	1.9	2.2	1.6
R5	1.5	1.1	1.7	2.2	2.3
T5	1.7	1.2	1.9	1.5	1.9
R6	0.7	2.7	1.9	1.4	2.5
T6	1.0	2.2	2.1	1.9	2.5
R7	0.9	2.0	2.1	2.0	1.2
T7	0.9	1.5	2.1	1.2	1.6
R8	0.3	1.9	0.7	2.0	2.0
T8	0.2	1.9	1.1	0.7	1.8
R9	-	1.5	0.8	1.0	-
T9	-	1.6	0.9	0.9	-
R10	-	0.1	0.5	-	-
T10	-	0.0	0.4	-	-
100	1	2	3	4	5
R1	2.4	2.3	1.8	2.3	1.9
T1	2.3	2.5	2.4	2.9	2.4
R2	1.7	1.7	2.0	1.7	1.5
T2	2.2	2.4	2.5	2.1	2.2
R3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.8
T3	2.5	2.7	2.5	1.8	2.0

R4	1.7	1.9	2.3	1.9	2.0
T4	2.5	2.8	2.1	2.0	2.5
R5	2.2	1.3	2.3	1.4	1.5
T5	2.9	2.0	2.6	1.5	1.6
R6	1.0	1.0	2.3	2.4	1.3
T6	1.1	1.8	2.5	2.4	1.9
R7	1.0	2.2	2.0	1.9	2.5
T7	1.2	3.0	2.5	2.0	1.9
R8	1.5	1.5	1.5	1.8	1.3
T8	2.2	2.4	2.0	2.0	1.5
R9	0.2	1.3	1.5	1.5	1.7
T9	0.1	2.6	2.0	1.4	1.9
R10	0.1	-	-	0.7	1.4
T10	0.0	-	-	0.7	2.1

Tabla 14. Control de pruebas en semillas de lechuga con biochar de 600° C.

c (-)	1	2	3	4	5
R1	2.5	3.0	2.5	2.4	1.0
T1	2.0	2.5	1.3	2.0	0.5
R2	2.5	3.0	2.3	3.5	1.5
T2	2.2	2.5	1.3	2.1	0.3
R3	2.8	3.5	2.4	2.5	1.5
T3	2.0	2.5	2.0	2.5	0.3
R4	2.4	2.4	2.5	3.2	1.2
T4	2.1	2.2	1.5	1.6	0.3
R5	2.3	3.1	3.0	3.8	1.0
T5	2.0	2.5	1.7	1.3	0.5
R6	2.5	3.0	2.4	5.1	1.4
T6	2.3	2.5	1.7	1.3	0.5
R7	3.0	3.0	2.1	3.9	1.5
T7	2.2	2.3	1.4	1.1	0.4

R8	2.2	3.0	3.0	4.3	1.0
T8	1.4	2.0	1.2	1.2	0.3
R9	0.8	1.4	3.0	0.8	1.0
T9	0.7	2.5	1.7	0.4	0.4
R10	0.2	2.7	2.9	3.2	1.2
T10	0.2	2.4	1.7	1.2	0.5
6.25	1	2	3	4	5
R1	2.7	3.0	3.0	2.2	1.1
T1	2.4	2.4	2.9	1.1	0.5
R2	1.9	3.4	2.2	2.3	1.2
T2	2.2	2.4	2.4	1.3	0.8
R3	3.3	2.1	3.4	2.3	1.8
T3	2.3	2.2	2.5	1.2	0.5
R4	3.1	2.7	2.5	2.6	1.5
T4	2.4	2.2	2.1	1.1	0.5
R5	2.6	3.3	3.6	2.0	2.3
T5	2.0	2.4	2.6	1.2	0.6
R6	2.8	2.3	2.9	2.4	2.1
T6	2.5	2.7	2.5	1.0	0.5
R7	3.0	3.3	3.6	2.3	1.8
T7	2.6	2.6	2.5	1.1	0.4
R8	2.7	2.9	2.9	2.4	1.2
T8	2.4	2.6	2.2	0.4	0.4
R9	3.1	2.1	2.7	2.2	1.8
T9	2.4	2.3	2.2	0.8	0.5
R10	1.1	3.1	3.1	3.1	0.5
T10	1.4	2.1	2.5	0.9	0.3
12.50	1	2	3	4	5

R1	2.4	2.5	3.5	3.7	3.6
T1	2.6	2.3	2.6	3.0	3.0
R2	2.0	3.7	3.2	3.5	3.5
T2	2.3	2.6	2.3	2.7	2.9
R3	2.3	2.8	3.3	3.0	3.0
T3	2.2	2.8	2.8	2.7	2.6
R4	2.5	3.4	2.8	3.5	2.7
T4	2.4	2.5	2.7	2.6	3.0
R5	2.7	3.2	2.8	3.5	3.4
T5	2.2	2.4	2.8	3.1	2.9
R6	2.1	2.7	3.4	2.9	3.3
T6	2.1	2.5	3.0	2.6	2.7
R7	2.1	2.7	3.3	3.5	1.8
T7	2.0	2.2	3.1	2.5	1.6
R8	2.0	3.5	3.2	3.5	1.3
T8	2.5	2.4	2.7	2.6	2.2
R9	2.7	3.2	3.7	3.4	1.0
T9	2.2	2.5	2.8	2.5	0.3
R10	2.5	3.5	1.8	1.2	0.5
T10	2.3	2.4	1.6	1.3	0.2
25.00	1	2	3	4	5
R1	3.2	3.0	3.4	2.5	2.5
T1	3.0	3.3	3.0	2.5	2.6
R2	3.2	3.0	3.2	3.0	2.5
T2	3.4	3.4	2.5	2.7	2.3
R3	2.1	3.0	2.3	2.0	3.0
T3	2.3	3.3	2.7	2.7	2.8
R4	3.0	3.0	2.0	3.0	2.5
T4	3.0	3.1	2.0	2.7	2.3
R5	2.6	2.8	2.5	2.7	2.4
T5	2.5	3.5	2.4	2.7	2.4

R6	3.5	2.9	2.3	3.0	1.0
T6	3.0	3.6	2.3	2.7	1.5
R7	2.7	3.0	3.5	3.0	2.4
T7	2.9	3.5	2.3	2.9	2.6
R8	1.1	3.2	3.1	2.4	2.4
T8	2.3	3.3	2.6	2.1	2.3
R9	2.8	3.0	3.2	2.4	2.4
T9	3.1	3.4	2.6	2.2	2.5
R10	3.5	3.5	3.0	2.5	2.0
T10	1.6	3.3	3.0	2.5	0.9
50	1	2	3	4	5
R1	2.5	2.7	2.9	2.8	1.0
T1	3.0	3.0	3.0	2.0	1.3
R2	2.5	3.1	3.0	3.3	1.9
T2	3.1	3.5	2.9	2.8	1.1
R3	2.0	2.0	3.2	2.7	2.0
T3	2.5	3.3	3.0	2.5	1.1
R4	3.4	2.5	2.7	2.7	2.5
T4	2.6	3.0	3.3	2.0	1.4
R5	2.0	2.5	2.0	2.7	1.5
T5	2.2	3.1	2.5	2.7	1.3
R6	2.2	2.5	2.0	2.8	1.7
T6	2.5	2.6	2.4	2.7	1.3
R7	2.3	2.5	2.3	2.6	2.4
T7	3.0	3.1	2.8	2.3	1.4
R8	3.0	2.9	3.0	3.2	2.0
T8	3.0	3.3	2.5	2.7	1.4
R9	3.0	2.7	2.2	3.0	2.0
T9	3.0	2.5	2.6	2.6	1.3
R10	0.4	2.3	2.5	3.2	1.6
T10	0.3	2.4	3.0	1.7	1.3

75	1	2	3	4	5
R1	2.2	2.5	2.5	2.8	2.2
T1	3.3	3.1	3.0	2.2	1.2
R2	2.0	2.1	2.3	3.0	2.4
T2	3.0	3.2	3.3	2.5	1.5
R3	2.4	2.7	2.5	3.0	2.2
T3	3.0	3.7	3.0	2.9	1.2
R4	1.8	2.5	0.9	1.5	2.5
T4	2.7	3.0	3.0	2.6	1.1
R5	2.2	2.5	3.1	3.1	2.6
T5	3.1	3.0	3.0	3.0	1.3
R6	2.0	2.4	2.6	2.9	3.0
T6	3.2	2.9	2.7	2.7	0.5
R7	2.4	2.5	2.7	2.7	2.5
T7	2.9	2.8	3.3	2.3	1.1
R8	1.9	2.8	2.9	2.6	2.2
T8	2.4	3.0	3.0	2.8	0.6
R9	2.1	2.2	2.2	2.7	2.5
T9	2.5	3.0	3.0	2.5	0.9
R10	2.2	2.2	2.2	2.5	1.9
T10	3.0	2.7	2.7	2.1	1.2
100	1	2	3	4	5
R1	2.2	2.4	2.4	2.7	1.5
T1	3.2	3.1	3.1	3.0	1.5
R2	2.0	2.6	2.5	2.6	1.5
T2	3.0	2.6	3.0	2.9	1.5
R3	2.6	2.4	2.5	3.0	1.8
T3	3.1	3.1	3.4	3.0	1.6
R4	2.5	2.7	2.5	2.4	1.6
T4	3.0	3.0	3.2	2.7	1.3
R5	2.4	2.7	2.5	1.9	2.5

T5	3.0	3.3	3.3	3.0	1.5
R6	2.4	3.0	3.0	2.0	1.0
T6	3.0	3.7	3.0	2.8	1.6
R7	2.8	1.0	3.0	2.8	1.8
T7	3.0	2.7	3.1	3.4	1.0
R8	2.7	2.0	2.4	2.9	2.0
T8	3.3	3.5	3.2	2.8	1.7
R9	2.5	2.5	2.2	2.7	1.8
T9	3.0	3.0	3.5	2.8	0.6
R10	0.3	2.2	2.3	1.1	2.1
T10	0.2	3.0	1.1	1.1	0.7

Tabla 15. Control de pruebas en semillas de lechuga con biochar de 900° C.

Tratamiento	Elongación a concentraciones de solución de biochar						
	C (-)	6.25%	12.5%	25%	50%	75%	100%
R1	2.5	2.3	2.5	2.3	2.2	2.2	2.1
T1	1.7	1.6	2.0	2.2	2.2	2.5	2.5
R2	2.7	2.6	2.4	2.4	1.7	2.2	1.7
T2	1.5	1.7	2.0	2.1	2.4	2.4	2.3
R3	2.1	2.3	2.6	1.9	1.8	2.3	1.7
T3	1.5	1.6	2.1	1.8	2.1	2.0	2.3
R4	2.0	2.2	2.6	2.3	1.6	1.8	2.0
T4	1.5	1.6	1.8	2.3	2.0	1.8	2.4
R5	2.4	2.0	2.0	2.1	1.7	1.8	1.7
T5	1.6	1.4	1.8	1.8	2.1	1.6	2.1
R6	2.2	1.8	2.1	2.2	1.6	1.8	1.6
T6	1.6	1.6	1.8	1.9	2.1	1.9	1.9
R7	2.2	2.1	2.0	1.5	1.6	1.6	1.9
T7	1.5	1.5	1.7	1.3	2.1	1.5	2.1
R8	2.2	1.8	5.1	1.3	1.5	1.4	1.5
T8	1.3	1.4	1.4	1.4	2.0	1.1	2.0

R9	1.5	1.4	1.2	1.4	1.8	1.1	1.2
T9	1.0	1.1	0.9	1.3	1.9	1.1	1.6
R10	1.5	0.5	0.2	-	1.9	0.3	0.7
T10	1.0	0.3	0.3	-	2.0	0.2	0.9

Tabla 16. Crecimiento de semillas de *Lactuca sativa* (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 600° C.

Tratamiento	Elongación a concentraciones de solución de biochar						
	C(-)	6.25%	12.5%	25%	50%	75%	100%
R1							
T1	0.8	0.7	0.4	0.12	0.1	-0.2	-0.4
R2							
T2	1.2	0.9	0.3	0.3	-0.6	-0.2	-0.6
R3							
T3	0.6	0.7	0.5	0.14	-0.3	0.2	-0.6
R4							
T4	0.5	0.6	0.7	0.08	-0.4	0.1	-0.4
R5							
T5	0.8	0.5	0.3	0.22	-0.4	0.1	-0.4
R6							
T6	0.5	0.2	0.4	0.32	-0.4	-0.1	-0.3
R7							
T7	0.7	0.6	0.3	0.14	-0.5	0.2	-0.2
R8							
T8	0.9	0.3	3.7	-0.02	-0.5	0.2	-0.5
R9							
T9	0.4	0.3	0.3	0.1	-0.1	0.0	-0.4
R10							
T10	0.5	0.2	-0.1	-	-0.1	0.1	-0.2

Tabla 17. Diferencia de elongación de *Lactuca sativa* (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 600° C.

Tratamiento	Elongación a concentraciones de solución de biochar						
	C(-)	6.25%	12.5%	25%	50%	75%	100%
R1	2.3	2.4	3.1	2.92	2.4	2.4	2.2
T1	1.7	1.9	2.7	2.88	2.5	2.6	2.8
R2	2.6	2.2	3.2	2.98	2.8	2.4	2.2
T2	1.7	1.8	2.6	2.86	2.7	2.7	2.6
R3	2.5	2.6	2.9	2.48	2.4	2.6	2.5
T3	1.9	1.7	2.6	2.76	2.5	2.8	2.8
R4	2.3	2.5	3.0	2.7	2.8	1.8	2.3
T4	1.5	1.7	2.6	2.62	2.5	2.5	2.6
R5	2.6	2.8	3.1	2.6	2.1	2.7	2.4
T5	1.6	1.8	2.7	2.7	2.4	2.7	2.8
R6	2.9	2.5	2.9	2.54	2.2	2.6	2.3
T6	1.7	1.8	2.6	2.62	2.3	2.4	2.8
R7	2.7	2.8	2.7	2.92	2.4	2.6	2.3
T7	1.5	1.8	2.3	2.84	2.5	2.5	2.6
R8	2.7	2.4	2.7	2.44	2.8	2.5	2.4
T8	1.2	1.6	2.5	2.52	2.6	2.4	2.9
R9	1.4	2.4	2.8	2.76	2.6	2.3	2.3
T9	1.1	1.6	2.1	2.76	2.4	2.4	2.6
R10	2.0	2.2	1.9	2.9	2.0	2.2	1.6
T10	1.2	1.4	1.6	2.26	1.7	2.3	1.2

Tabla 18. Crecimiento de semillas de *Lactuca sativa* (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 900° C.

Tratamiento	Elongación a concentraciones de solución de biochar						
	C(-)	6.25%	12.5%	25%	50%	75%	100%
R1							
T1	0.54	0.44	0.04	0.04	-0.1	-0.1	-0.5
R2							
T2	0.38	0.62	0.12	0.12	0.1	-0.3	-0.4

R3							
T3	0.84	0.26	-0.28	-0.28	-0.1	-0.2	-0.4
R4							
T4	0.82	0.34	0.08	0.08	0.3	-0.6	-0.3
R5							
T5	1	0.44	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.4
R6							
T6	0.66	0.3	-0.08	-0.08	-0.1	0.2	-0.5
R7							
T7	0.96	0.4	0.08	0.08	-0.1	0.1	-0.4
R8							
T8	0.82	0.22	-0.08	-0.08	0.2	0.1	-0.5
R9							
T9	0.74	0.74	0	0	0.2	0.0	-0.2
R10							
T10	0.74	0.34	0.64	0.64	0.3	-0.1	0.4

Tabla 19. Diferencia de elongación de *Lactuca sativa* (lechuga) en presencia de biochar obtenido a 900° C.

900°	C	6.25	12.5	25	50	75	100
R1	1	10	9	8	10	0	10
R2	7	10	7	9	10	0	3
R3	3	9	10	10	7	0	9
R4	7	8	10	8	9	0	9
R5	6	8	9	10	7	0	8
	23	5	5	5	7	50	11
	4.8	9	9	9	8.6	0	7.8
Muerte	10	0.9	0.9	0.9	0.86	0	0.78
Conc. (%)	% Muerte			Probit			
6.25	10			3.72			
12.5	10			3.72			

25			10				3.72
50			12				6.08
75			86				6.33
100			100				3.82

600°	C	6.25	12.5	25	50	75	100
R1	9	7	9	10	9	10	0
R2	10	10	8	10	7	10	0
R3	10	10	10	10	9	10	0
R4	10	9	10	8	8	10	0
R5	10	10	10	10	10	10	0
	9.8	9.2	9.4	9.6	8.6	10	0
MUERTE	10	8	6	4	14	0	100

Conc. (%)	% Muerte	Probit
6.25	8	3.59
12.5	6	3.45
25	4	3.25
50	14	3.92
75	0	0
100	100	6.33

Tabla 20. Cálculos del método Probit para biochars de 900°C y 600°C.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



NFORME DE ENSAYOS
LASAQ N°13-2021-DQ

SOLICITANTE : Maura Ericka Chuquiyauri Solano
 PRODUCTO DECLARADO : Biochar de la cascarilla de arroz
 NÚMERO DE MUESTRAS : 03
 CANTIDAD RECIBIDA : 500.0 g
 MARCA : sin marca
 FORMA DE PRESENTACIÓN : En bolsa ziploc
 MUESTREADO POR : Muestra proporcionada por el solicitante.
 FECHA DE RECEPCIÓN : 15 de Julio del 2021
 FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: 26 de Julio del 2021
 ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO

ENSAYO	RESULTADOS		
	Cascarilla	600°C	900°C
1.-Humedad (%)	10.11	0.86	0.06
2.-Cenizas Totales % MS	14.0	66.7	85.1
3. Pérdidas por calcinación LOI (%MS)	86.0	33.5	15.0
4.- Carbono Orgánico Total (%MS)	49.9	19.5	8.7
5.- Nitrógeno (%MS)	0.84	0.45	0.23
6- Relación C/N	59.40	43.33	37.83
7.- pH (T° 22 °C)	7.39	10.76	10.92
8.- Conductividad Eléctrica (uS/cm)	653.0	1597	808
9. Densidad Aparente (kg/l)	0.39	0.46	0.43

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:

- 1.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.8.2
- 2.- ASTM American Society for testing and materials 1998 D 5142-90
- 3.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.1 (Por Cálculo)
- 4.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.3 (Por Cálculo)
- 5.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.2
- 6.- BGBl. II Bundesgesetzblatt 2001-Nr. 292 parte 3.1.4 (Por Cálculo)
- 7.- Standard Methods 20 th Edition 4500-H+
- 8.- Standard Methods 20 th Edition 2510

Atentamente:

Mg.Sc. Diego Suarez Ramos
JEFE DEL LABORATORIO DE
ANÁLISIS QUÍMICO

Mg.Sc. JUAN CARLOS PALMA
 DIRECTOR
 DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
 Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS ELEMENTAL (C, H, N, O, S)
LER – BIOMASA 014 - 2021

Solicitante : Srta. Maura Ericka Chuquiyaury Solano
Atención : Srta. Maura Ericka Chuquiyaury Solano
Muestra : Cascarilla de arroz
Procedente de : Lima.
Fecha Recepción : 22 / 07 / 2021
Norma : ASTM D5373 - ASTM D4239

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
UBE-(07/2021)-0011	Cascarilla de arroz	---	5.59	---	0.13	38.12

NOTA:

- El análisis se realizó con la muestra en base seca (la muestra tal como se recibió fue secada en estufa durante 24 horas a 105 °C), con humedad entre 0% a 05%.



Laboratorio de
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.
 Jefe del Laboratorio de
 Energías Renovables



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS DE PODER CALÓRICO
(CALORÍMETRO)
LER – BIOMASA 015 – 2021

Solicitante : Srta. Maura Ericka Chuquiyaury Solano
Atención : Srta. Maura Ericka Chuquiyaury Solano
Muestra : Cascarilla de arroz
Procedente de : Lima.
Fecha Recepción : 22 / 07 / 2021
Norma : ASTM D5865 - 13

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (kCal/kg)	PCI (kCal/kg)
UBE-(07/2021)-0011	Cascarilla de arroz	3530.94	---

NOTA:

- El PCS se obtiene de la muestra analizada en base seca (la muestra tal como se recibió fue secada en estufa durante 24 horas a 105 °C), con humedad entre 05% a 10%.



Laboratorio de
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.
Jefe del Laboratorio de
Energías Renovables