

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EL BIOCHAR DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH
PROCEDENTE DE LOS RESIDUOS DEL APROVECHAMIENTO DE
PLANTACIONES FORESTALES COMO
ENMIENDA ORGÁNICA PARA EL SUELO”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL**

GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS

LIMA – PERÚ

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“EL BIOCHAR DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH
PROCEDENTE DE LOS RESIDUOS DEL APROVECHAMIENTO DE
PLANTACIONES FORESTALES COMO
ENMIENDA ORGÁNICA PARA EL SUELO”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL**

GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

PhD. Héctor Enrique Gonzales Mora
PRESIDENTE

Dr. Carlos Augusto Reynel Rodríguez
MIEMBRO

Lic. Deysi Rocío Guzmán Loayza
MIEMBRO

Dr. Julio César Alegre Orihuela
ASESOR

Mg. Sc. Mary Flor Césare Coral
CO - ASESORA

Lima, Perú
2020

DEDICATORIA

*A mamá y papá
en todo espacio y tiempo.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mi alma máter, por la formación integral, no solo para el ámbito laboral si no para la vida. Me quedo con la certeza de que haber sido parte de la Agraria fue la mejor decisión de mi vida.

A mi Facultad de Ciencias Forestales, a todo el personal docente, administrativo y compañeros, por convertirse en familia durante mi vida universitaria.

Al Prof. Enrique Gonzales Mora, por el empujón inicial y la confianza brindada al momento de cuajar la idea del trabajo de investigación.

Al Prof. Julio Alegre, por su tiempo, conocimiento y el valioso soporte académico de forma permanente durante la concepción y ejecución de la investigación.

A la Prof. Mary Flor, por todo el apoyo, aporte con su conocimiento y el acompañamiento permanente para llevar a cabo la investigación.

A la Prof. Maricel Móstiga, por el apoyo brindado a lo largo de la investigación y sobre todo por el aliento constante para lograr el objetivo.

Al Proyecto de Investigación, bajo Convenio N°174-2015-FONDECYT: “Círculo de Investigación para el desarrollo de la cadena de valor del bambú para el desarrollo científico y tecnológico”.

Al Sr. Mario, por la gran ayuda y aporte con su experiencia.

A Richard Huaraca, por su espíritu incansable durante las largas horas de estudio y por estar siempre ahí con ese brazo hermano que facilita el recorrido.

A Jhonatan Vásquez por su conocimiento y experiencia, los cuales permitieron atar cabos y consolidar la investigación.

A papá Gilberto, por la buena formación que me dio en mis primeros años de vida y porque esté donde esté, siempre está cuidando de mí.

A mamá Zaida, por darme la libertad y el apoyo incansable en la toma de decisiones a lo largo de mi vida. Por tomar el papel de padre y madre, y duplicando su amor, llenar la ausencia de papá.

A Julissa, mi hermana mayor, porque con su experiencia y ejemplo, me encamino en la vida.

A Jhoana, mi hermana menor, por irradiarnos con su alegría y ocurrencias. Y por hacerme inflar el pecho con sus logros.

A Milagritos, mi segunda mamá, por su gran amor fraternal.

A mi tía Aymar, tío Canetos y a mis primos Heli, Emilser, Erick, Stephany y Anthony por ese enorme cariño y por estar conmigo en todo momento.

A mis hermanos del alma, Flavio, Bryan, Christian y Luis Antonio, por la vida compartida.

A Malú, coprotagonista de mis sueños, por ser y sobre todo por estar.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1 Descripción botánica de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	4
2.1.1 Taxonomía.....	4
2.1.2 Morfología.....	4
2.1.3 Composición química del culmo	7
2.2 Plantaciones de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth en La Florida – Cajamarca	7
2.2.1 Manejo	7
2.2.2 Residuos de biomasa	7
2.2.3 Carbón de bambú	8
2.3 El biochar	9
2.3.1 Definición.....	9
2.3.2 Historia.....	9
2.3.3 Proceso de producción	10
2.3.4 Propiedades físicas y químicas	13
2.4 Procesos de transformación de la biomasa vegetal	18
2.4.1 Dosis de aplicación	21
2.5 El maíz como cultivo indicador.....	21
III. METODOLOGÍA	23
3.1 Lugar de ejecución.....	23
3.2 Materiales	23
3.2.1 Materia prima	23
3.2.2 Insumos	23
3.2.3 Instrumentos y herramientas	23
3.2.4 Equipos.....	24
3.2.5 Materiales complementarios	24
3.3 Metodología	24

3.3.1 Producción de biochar -----	25
3.3.2 Aplicación del biochar -----	29
3.3.3 Evaluación del cultivo indicador y del suelo -----	37
3.3.4 Análisis estadístico -----	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSION -----	43
4.1 Del proceso de producción del biochar -----	43
4.1.1 Rendimiento -----	43
4.1.2 Calculo de la densidad aparente del biochar molido -----	44
4.2 De las propiedades físicas y químicas del suelo -----	45
4.2.1 Análisis de la caracterización del sustrato -----	45
4.3 Respuesta de la aplicación del biochar y el crecimiento y desarrollo del cultivo indicador: <i>Zea mays</i> L -----	48
4.3.1 Germinación -----	48
4.3.2 Altura de las plantas -----	49
4.3.3 Grosor de tallo -----	50
4.3.4 Biomasa aérea -----	51
4.3.5 Biomasa radicular -----	54
4.3.6 Análisis foliar -----	55
V. CONCLUSIONES -----	58
VI. RECOMENDACIONES -----	59
VII. BIBLIOGRAFIA -----	60
VIII. ANEXOS -----	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de pirólisis y transformación de la materia prima inicial en subproductos pirolíticos-----	12
Tabla 2: Tipos de pirólisis y rendimientos típicos de productos -----	12
Tabla 3: Análisis físico-químico del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth-----	13
Tabla 4: Análisis químico del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth-----	14
Tabla 5: Análisis químico elemental del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth -----	15
Tabla 6: Análisis termogravimétrico del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth -----	16
Tabla 7: Resultados de características del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth -----	16
Tabla 8: Tratamientos en evaluación-----	33
Tabla 9: Rendimiento de la producción de biochar con el uso de un horno pirolítico artesanal de doble tambor-----	43
Tabla 10: Densidad aparente del biochar de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth molido y tamizado con una malla 32 ASTM -----	44
Tabla 11: Análisis de caracterización de la tierra de chacra al inicio – propiedades físicas	46
Tabla 12: Densidad aparente del sustrato tierra de chacra antes de los tratamientos-----	46
Tabla 13: Análisis de capacidad de campo del sustrato al final de los tratamientos -----	46
Tabla 14: Caracterización del sustrato al inicio y al final de los tratamientos -----	47
Tabla 15: Reserva de nutrientes para cada tratamiento en evaluación -----	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Órganos vegetativos de una planta adulta de <i>Guadua Angustifolia</i> -----	6
Figura 2: Alcance de los usos ambientales del carbón de bambú -----	8
Figura 3: Etapas del trabajo de investigación -----	25
Figura 4: Procedimientos para la producción de biochar-----	25
Figura 5: Medida del contenido de humedad externo -----	26
Figura 6: Medida del contenido de humedad interno -----	26
Figura 7: Pesado de residuos -----	26
Figura 8: Llenado del tambor pequeño -----	26
Figura 9: Colocación de la leña -----	27
Figura 10: Puesta en marcha del proceso de pirólisis-----	27
Figura 11: Monitoreo de la temperatura durante la pirólisis-----	28
Figura 12: Pesado del biochar producido-----	29
Figura 13: Procedimientos para la aplicación del biochar -----	29
Figura 14: Molido de grano-----	30
Figura 15: Molienda del biochar producido-----	30
Figura 16: Tamizado del biochar molido -----	31
Figura 17: Pesado del biochar tamizado para la preparación de dosis -----	32
Figura 18: Dosis de 20, 40, 80, y 160 gramos de biochar -----	32
Figura 19: Preparación del sustrato -----	33
Figura 20: Distribución de las 30 macetas del ensayo -----	34
Figura 21: Macetas del ensayo -----	35
Figura 22: Llenado de las 30 macetas con el sustrato: tierra de chacra -----	35
Figura 23: Aplicación de dosis correspondientes-----	36
Figura 24: Siembra de <i>Zea mays</i> L. -----	37
Figura 25: Procedimientos para la evaluación del cultivo indicador -----	37
Figura 26: Medición del grosor del tallo con un vernier digital -----	38
Figura 27: Medición de la altura de las plantas -----	38
Figura 28: Cosecha de la parte aérea de las plantas -----	39

Figura 29: Obtención de la biomasa radicular de las plantas -----	40
Figura 30: Momentos de la evaluación del sustrato-----	40
Figura 31: Toma de muestra de suelo para el análisis de caracterización -----	41
Figura 32: Macetas representativas de cada tratamiento -----	49
Figura 33: Efecto de los tratamientos sobre la variación de altura del maíz -----	50
Figura 34: Efecto de los tratamientos sobre la variación del grosor del tallo del maíz -----	51
Figura 35: Efecto de los tratamientos sobre la biomasa aérea de las plantas -----	52
Figura 36: Macetas testigo y fertilizado con el tratamiento B-160 -----	53
Figura 37: Macetas testigo y fertilizado con el tratamiento B-20-----	53
Figura 38: Efecto de los tratamientos sobre la biomasa radicular de las plantas de maíz --	54
Figura 39: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de N en las hojas del maíz--	55
Figura 40: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de P en las hojas del maíz --	56
Figura 41: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de K en las hojas del maíz--	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de caracterización de la tierra de chacra que se empleó como sustrato para el ensayo experimental -----	68
Anexo 2: Análisis de la caracterización del sustrato de cada uno de los tratamientos del ensayo experimental-----	69
Anexo 3: Análisis especial en foliar para las hojas de <i>Zea mays</i> L., para determinar la concentración de nitrógeno, fósforo, y potasio -----	70
Anexo 4: Análisis estadístico para la concentración de nitrógeno (N) en las hojas de <i>Zea mays</i> L., Generado por el paquete estadístico R -----	72
Anexo 5: Análisis estadístico para la concentración del fósforo (P) en las hojas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R -----	75
Anexo 6: Análisis estadístico para la concentración del potasio (K) en las hojas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R -----	78
Anexo 7: Análisis estadístico para la biomasa aérea de las plantas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R-----	81
Anexo 8: Análisis estadístico para la altura de las plantas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R-----	84
Anexo 9: Análisis estadístico para el grosor de las plantas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R-----	88
Anexo 10: Análisis estadístico para la biomasa aérea de las plantas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R-----	92
Anexo 11: Análisis estadístico para la biomasa radicular de las plantas de <i>Zea mays</i> L., generado por el paquete estadístico R-----	95

RESUMEN

La investigación fue realizada en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y tuvo como objetivo evaluar el biochar de *Guadua angustifolia* Kunth como enmienda orgánica para el suelo. El biochar fue elaborado a partir de residuos del aprovechamiento de plantaciones forestales, mediante pirólisis lenta, en un rango de temperatura de 400 a 530 °C. Con la finalidad de conocer la aptitud del biochar, éste se aplicó en diferentes concentraciones: 20, 40, 80 y 160 gramos, (los cuales equivalen a 5, 10, 20 y 40 tn/ha respectivamente), en macetas de 10kg. Luego, se evaluaron las propiedades físicas y químicas del suelo y el crecimiento y desarrollo del cultivo indicador (*Zea mays* L.). Las metodologías empleadas fueron: procedimientos para la producción de biochar, determinación en laboratorio de las características físicas y químicas del suelo, concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en las hojas del cultivo indicador, así como la evaluación de su crecimiento y determinación de la biomasa aérea y radicular. Bajo las condiciones estudiadas, se lograron rendimientos de 26.35 a 29.28 por ciento para la producción de biochar y éste tuvo una densidad promedio de 0.2594 g/cm³. Con la aplicación del biochar en dosis de 80 y 160 gramos se observaron tendencias de incremento en la altura, grosor de tallo, biomasa aérea y radicular del cultivo indicador. Sin embargo, estos resultados fueron inferiores a los obtenidos con el tratamiento fertilizado. Los resultados obtenidos estarían asociados a la mejora de las características del sustrato post aplicación de la enmienda orgánica en forma de biochar. En ese sentido, la aplicación del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth al suelo es una estrategia sostenible por aprovechar residuos de plantaciones forestales, por su potencial contribución con la mejora de las condiciones estructurales del suelo y como agente generador de condiciones favorables para la asimilación de nutrientes para las plantas.

Palabras clave: Biocarbón, pirólisis, bambú, crecimiento, biomasa aérea y radicular.

ABSTRACT

*The research was conducted at the campus of Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) and aimed to evaluate the *Guadua angustifolia* Kunth's biochar, as an organic amendment for the soil. The biochar was made from forest plantations residues, by slow pyrolysis, in a temperature range of 400 to 530 ° C. In order to know the biochar's aptitude, it was applied in different concentrations: 20, 40, 80, 160 grams (which is equivalent to 5, 10, 20 y 40 t/ha), to 10 kg individual pots. Then, both the physical and chemical properties of the soil and the growth and development of the indicator crop (*Zea mays* L.) were evaluated. The methodologies used, were: the procedures for the production of biochar, determination at the laboratory level of the physical and chemical characteristics of the soil, the concentration of nitrogen, phosphorus and potassium in leaves of the indicator crop, as well as the evaluation of its growth, aerial and root biomass. Under the conditions studied, yields of 26.35 to 29.28 per cent were achieved for the production of biochar, and this one, had an average density of 0.2594 g/cm³. Through the application of the biochar in doses of 80 and 160 grams, it was noticed the trending of increase in height, stem thickness, aerial and root biomass of the indicator crop were observed. However, these results were lower than those obtained with the fertilized treatment were. The results would be associated with the improvement of the characteristics of the soil after organic amendment biochar's application. Therefore, the application of *Guadua angustifolia* Kunth's biochar to the soil could be a sustainable strategy for taking advantage of forest plantation residues, thanks to its potential contribution to the improvement of soil structural properties, and as a generating agent of favorable conditions for plants' nutrients assimilation.*

Keywords: *Biochar, pyrolysis, bamboo, growth, aerial and root biomass.*

I. INTRODUCCIÓN

La Estrategia Europea para la Protección del Suelo pone de manifiesto el papel fundamental que tiene el suelo como recurso natural, desde una perspectiva agrícola y natural (Moreno *et al.* 2007). Según FAO (2009), en el año 2050 la demanda de alimentos se incrementará en un 70 por ciento, y el reto será producir alimentos suficientes, con calidad adecuada y en forma sostenible. El suelo jugará un papel fundamental colaborando al incremento de la productividad agrícola. Sin embargo, bajo condiciones ambientales difíciles y frágiles, los suelos sufren procesos de degradación por erosión hídrica o eólica, compactación y pérdida de materia orgánica (Moreno *et al.* 2007).

“La restauración de suelos degradados es un proceso complejo, de largo plazo y costoso, todos los esfuerzos se deben centrar en la conservación y prevención de la contaminación del recurso edáfico. La restauración de suelos erosionados, busca atenuar la pérdida actual del suelo, la revegetación temporal y definitiva, y la aplicación de técnicas de conservación del suelo con especial énfasis en el empleo de enmiendas orgánicas” (UMH, 2016).

Escalante *et al.* (2016) menciona que existen tecnologías para contrarrestar la degradación del suelo como la aplicación de biocarbón (biochar), que es un subproducto de la pirólisis de biomasa residual. Existen experiencias positivas derivadas de la aplicación de biochar al suelo, que generan una mejora en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y se traduce en el aumento de la productividad de los cultivos. Una de estas experiencias fue la realizada por Chan *et al.* (2007), donde se elaboró biochar a partir de residuos verdes a tres dosis (10, 50, 100 t/ha) con y sin aplicación de nitrógeno (100 kg N/ha); y se observó una interacción significativa con el fertilizante nitrogenado pues a medida que aumentaba la dosis de biochar aumentaba el rendimiento de *Raphanus sativus var. Long Scarlet* (rábano).

Un beneficio adicional es que la materia prima para su producción proviene de residuos orgánicos, que a menudo causan problemas de contaminación ambiental. (Escalante *et. al*, 2007).

El Perú es el noveno país de mayor superficie forestal a nivel mundial, y el segundo en Sudamérica después de Brasil. Su patrimonio forestal constituye un importante potencial para la generación de mano de obra y la protección ambiental. Estos bosques naturales, constantemente vienen siendo afectados por la deforestación para el cambio de uso de la tierra orientado a las actividades agropecuarias no sostenibles, extracción selectiva de especies valiosas y desbosques para la instalación de cultivos ilícitos (MINAG, 2008). En este contexto, las plantaciones forestales constituyen una alternativa frente a la deforestación y el cambio de uso de la tierra. Dentro de muchas de las especies forestales que se proponen para dichos planes de reforestación, en los últimos años el bambú viene teniendo mucha acogida debido a su corto periodo de crecimiento y la infinidad de productos que se puede elaborar a partir de esta especie.

Martínez (2005) menciona que la *Guadua angustifolia* Kunth es una de las especies de mayor demanda y mejor aceptación por parte del sector productivo, brindando además una serie de beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades. En el Perú, es la especie de bambú más utilizada debido a la resistencia de sus culmos que la hacen deseable para su uso en construcciones, generalmente rurales (Espinoza, 2010). Pese a ello, existen pocas experiencias de plantaciones manejadas, siendo cultivada con fines de producción solo en algunas regiones como Piura, Cajamarca, Amazonas, Lambayeque y Lima y su mercado actual está principalmente orientado al uso del culmo como material de construcción, según lo indican Takahashi y Ascencios (2004).

En el Perú las plantaciones de *Guadua angustifolia* Kunth se han incrementado considerablemente, debido a su rápido crecimiento y uso de productos variados (artesanales e industriales) que se le puede dar a esta especie y la alta rentabilidad que pueden generar aún en parcelas pequeñas (Takahashi, 2016). Existen muchas posibilidades de desarrollo de nuevos productos y usos aún no explorados para el bambú (Espinoza, 2010).

La cosecha de las plantaciones de *Guadua angustifolia* Kunth genera entre 2 y 4 toneladas/ha/año de residuos, los que son dejados en el campo para su posterior quema o

simplemente su descomposición (Salas, 2006). Por lo tanto, es importante aprovechar dichos residuos como leña o carbón, y contar con infraestructura para el tratamiento, reciclado y personal calificado.

El aprovechamiento de los culmos de bambú genera residuos que, en la mayoría de casos, se dejan en la plantación para su descomposición. Siendo posible utilizar estos residuos como leña o carbón (UNISS, 2017).

En las plantaciones de *Guadua angustifolia* Kunth de la Florida, Cajamarca no se vienen aprovechando los residuos que se generan en la cosecha de culmos y se dejan en la plantación para su descomposición o son quemados. La elaboración de biochar a partir de residuos del aprovechamiento de estas plantaciones pretende contribuir al manejo de residuos y elaborar una enmienda orgánica para suelos degradados o infértiles, los cuales, según el INEI (2015) representan el 33,40 por ciento del territorio nacional. Para ello se aplicó el biochar en diferentes concentraciones y se evaluaron tanto las propiedades físicas y químicas del suelo como el crecimiento y desarrollo del cultivo indicador (*Zea mays* L.).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Descripción botánica de la *Guadua Angustifolia* Kunth

Cruz (2009) manifiesta que, de las 1040 especies de bambúes que existen en el mundo, la *G. angustifolia* Kunth, está seleccionada dentro de las 20 que conforman “las especies prioritarias de bambú”. La *Guadua*, conocida científicamente como *Guadua angustifolia* Kunth, su resistencia físico-mecánica lo ha convertido en uno de los bambúes más importantes del mundo y el más importante de América. Es nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador.

2.1.1 Taxonomía

Cruz (2009) describe taxonómicamente a la especie de la siguiente manera.

Reino: Vegetal

División: Spermatofita

Subdivisión: Angiospermae

Clase: Monocotiledoneae

Orden: Glumiflorales

Familia Poaceae o Gramineae

Subfamilia: Bambúsoideae

Supertribu: Bambusodae

Tribu: Bambuseae

Subtribu: Guadinae

Género: *Guadua*

Especie: *Guadua angustifolia* Kunth

2.1.2 Morfología

Londoño (2010) describe morfológicamente a la *G. angustifolia* Kunth como una especie que se caracteriza por ser leñosa y espinosa, cuyos culmos miden de 15 a 20 metros de altura y presenta un diámetro de 7-10 cm. Presenta entrenudos huecos, con longitudes entre 12 – 30 cm en el 1/3 basal y 30 – 43 cm en el 1/3 medio, nudo solitario, línea nodal horizontal,

pronunciada, con banda de pelos blancos, adpresos, arriba y debajo de la línea nodal. Hoja caulinar coriácea, deciduas, de color café rojizo, abaxialmente hispida, cubierta por dos tipos de pubescencia: pelos cortos, tormentosos y pelos hispídos.

Raíces: En la Guadua las raíces están especializadas en la obtención de agua y nutrientes, dejando las funciones de reserva nutricionales y de soporte en un altísimo porcentaje al rizoma. El 40 por ciento de las raíces emergen de la parte ventral del rizoma y tienen una orientación vertical, alcanzando hasta 2.5 metros de profundidad (dependiendo de la textura del suelo). El 60 por ciento restante, brotan de las ramificaciones del rizoma y de sus partes laterales, presentan crecimiento horizontal pudiéndose extender distancias de hasta 5 metros (Cruz, 2009).

Tallos

Tallo modificado en Rizoma: Cruz (2009) menciona que el sistema de rizomas en los bosques de Guadua, como en la gran mayoría de monocotiledóneas rizomatosas es de tipo paquimorfo, en donde la zona engrosada y ensanchada es corta y gruesa dependiendo de la edad de la planta. También afirma que es un tallo rastrero de crecimiento plagiotrópico; crecimiento paralelo al suelo, con presencia de nudo, entrenudos y yemas.

Tallo aéreo o culmo: Cruz (2009) define al culmo como el eje segmentado que emerge del rizoma. Tanto el rizoma como el culmo, están constituidos por un sistema de ejes vegetativos segmentados que forman secuencialmente nudos y entrenudos que modifican su tamaño y longitud según la parte de la planta donde se encuentren ubicados.

Ramas

Ramas Basales: Brotan de las yemas de los nudos del primer cuarto del culmo y poseen crecimiento plagiotrópico. En estas ramas basales, la presencia de espinas cumple funciones de protección, mientras que las yemas biogénicas en estas ramas organogénicas cumplen funciones de propagación (Cruz, 2009).

Ramas apicales: Empiezan a brotar desde un poco más arriba de la tercera cuarta parte del culmo y poseen crecimiento ortotrópico. Estas ramas son las encargadas de sostener las hojas típicas, las cuales ejercen funciones fotosintéticas (Cruz, 2009).

Hojas

Hojas caulinares: Son órganos foliares modificados, que nacen en los nudos del culmo, de consistencia fuerte y forma triangular, que tienen como función proteger la yema que da origen a las ramas y al follaje (Cruz, 2009).

Hojas típicas: Son los órganos vegetativos responsables de la fotosíntesis (Cruz, 2009).

Yemas: Existen dos tipos de yemas: las yemas axilares, que se localizan en las axilas de las hojas de las ramas superiores e inferiores y las yemas nodales, se presentan tanto en los nudos del rizoma, en los nudos de las ramas y en cada nudo del culmo. (Cruz, 2009)

Flores: Las flores de la Guadua se presentan unidas en un eje formando la típica espiguilla de las gramíneas. Esas estructuras se llaman inflorescencias en espigas o espiguillas; sin embargo, en la Guadua, las espiguillas se disponen en ramificaciones especiales denominadas pseudoespiguilla, donde las verdaderas espiguillas se disponen en la parte más alejada del eje. Cruz (2009).

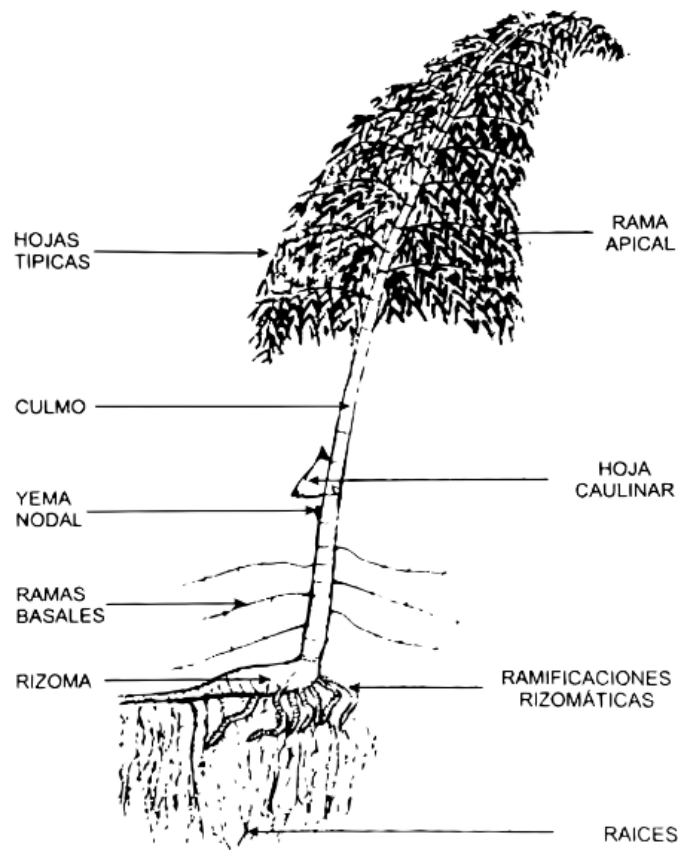


Figura 1: Órganos vegetativos de una planta adulta de *Guadua angustifolia*

Fuente: Cruz (2009).

2.1.3 Composición química del culmo

Gutiérrez (2015) realizó la caracterización química de secciones de culmo correspondiente a la cepa y basa de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) de cuatro años de edad, proveniente del distrito de La Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca, la cual contenía 24,07 por ciento de lignina, 68,30 por ciento de holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y 7,54 por ciento de extractivos (en etanol al 96 por ciento).

Césare (2019), en su estudio relacionado a la caracterización física y química del bambú (*Guadua angustifolia*) encontró un pH de 6.14 para la mencionada especie.

2.2 Plantaciones de *Guadua angustifolia* Kunth en La Florida – Cajamarca

2.2.1 Manejo

Llerena (2008) menciona que en la cuenca del río Zaña existe un sistema productivo diversificado con café, plátano, chirimoya, granadilla, naranja, guayaquil, grevilea y huertos de hortalizas que cumplen el propósito de dar seguridad alimentaria a la población. Menciona también que el guayaquil está desplazando al café y al plátano, debido a diferentes circunstancias como la crisis de precios del café, el minifundio, la poca inversión que demanda el cultivo de guayaquil y la gran demanda que tienen estas cañas en el mercado.

En el distrito de La Florida, provincia de San Miguel, Cajamarca, las familias contaban como parte de su economía la venta de la caña guayaquil (*Guadua angustifolia*) procedente de cultivos, cuyos establecimientos se remontan desde aproximadamente 70 años, según información de los pobladores de la zona. Estas plantaciones no contaban con un manejo técnico adecuado, provocando así la baja productividad y calidad del producto final y el consecuente escaso valor agregado. Las áreas de guayaquil se vienen incrementando anualmente de manera considerable, y se utiliza mayormente para el autoconsumo en la construcción de techos y de alguna infraestructura agrícola (Llerena, 2008).

2.2.2 Residuos de biomasa

El aporte anual de biomasa general de un guadual en pleno desarrollo oscila entre 30 y 35 toneladas/ha/año, sabiendo esto y el rápido crecimiento de la guadua, un guadual puede producir y aportar al suelo entre 2 y 4 toneladas/ha/año de biomasa, volumen que varía según el grado de intervención del guadual. La biomasa es importante, ya que contribuye a

enriquecer y mejorar la textura y estructura del suelo (Giraldo y Sabogal citado por Salas (2006)).

2.2.3 Carbón de bambú

Según Campos *et al.* (2003), la alta superficie de adsorción que presentan las partículas de carbón, producido a partir de bambú, en relación a otros carbones vegetales, le otorgan a este producto una diversidad de usos potenciales en sus diferentes estados de elaboración: en estado original, en polvo, pelletizado, granulado, en briquetas, en forma de carbón activado ya sea por medios físicos o químicos. También afirman que, en los países en desarrollo, el uso más intensivo de los carbones vegetales, es con fines energéticos, principalmente a nivel doméstico donde se utiliza para calefacción y preparación de alimentos. Por otro lado, en los países industrializados, como consecuencia de los procesos de polución ambiental, el uso principal en la actualidad se presenta en la función de mejoramiento de condiciones ambientales. En este ámbito el carbón de bambú está siendo estudiado y ampliamente utilizado, con el objetivo de aprovechar sus propiedades como adsorbente, semiconductor y modificador de campos electromagnéticos (Campos *et al.*, 2003).

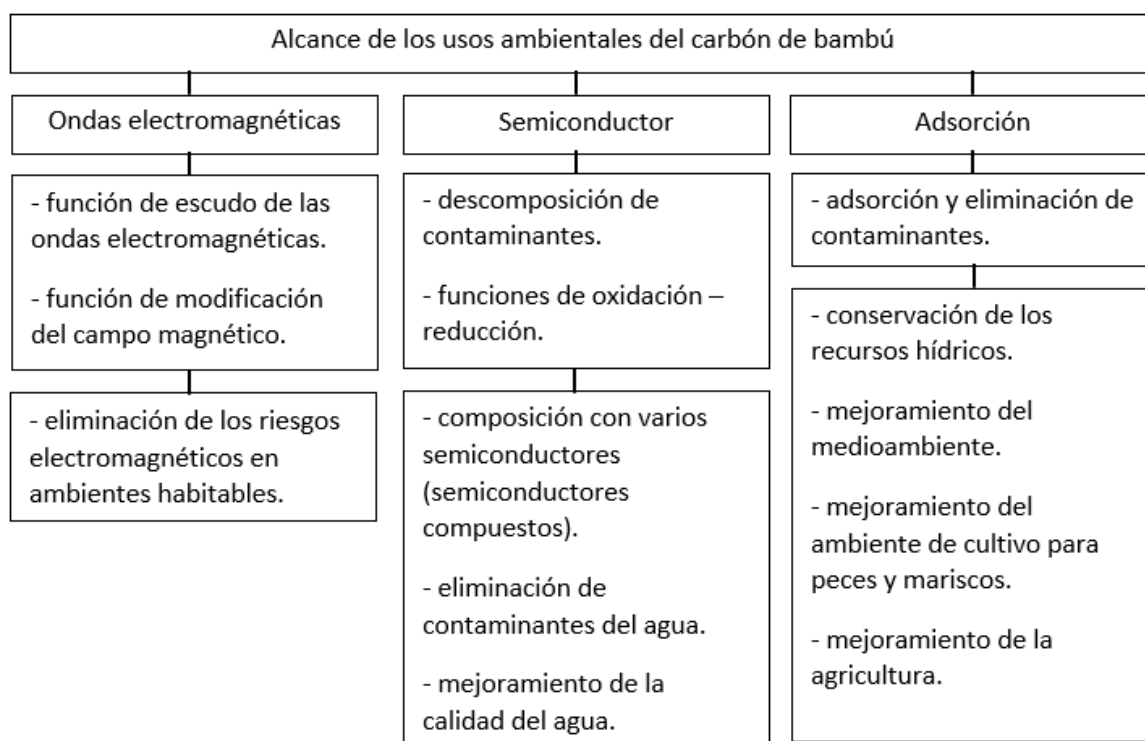


Figura 2: Alcance de los usos ambientales del carbón de bambú.
Fuente: Adaptado de (Campos *et al.*, 2003).

2.3 El biochar

2.3.1 Definición

Escalante *et al.* (2016) mencionan que el biochar o biocarbón es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos con escaso o limitado suministro de oxígeno, lo cual corresponde a un proceso de pirólisis, a temperaturas relativamente bajas (inferiores a los 700 °C) y que a diferencia del carbón usado como combustible y del carbón activado, el biocarbón es destinado a uso agrícola.

Por otro lado, la Iniciativa Internacional del Biochar “IBI” por sus siglas en inglés (2015) define al biochar como un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno.

Lehmann y Joseph (2009) definen al biochar como un material carbonizado obtenido a partir de biomasa con alto contenido de carbono, la cual se ha pirolizado en un entorno de oxígeno nulo o muy bajo y mediante procesos sostenibles. Además, mencionan que la producción de biochar resulta similar a la producción de carbón vegetal, que es un proceso conocido desde la antigüedad; sin embargo, la principal diferencia que existe entre el carbón vegetal y el biochar es la finalidad de su producción. Si el material que ha sido carbonizado se aplica al suelo, ya sea para mejorar propiedades del suelo, almacenar carbono y/o retener agua, recibirá el nombre de biochar.

2.3.2 Historia

Según Woods (2004), los investigadores Smith y Hartt en los años de 1879 y 1885 respectivamente, consignaron la existencia de unos suelos oscuros y fértiles en la Amazonía brasileña, estas eran conocidas como las tierras negras de los indios amazónicos de Brasil y descritas por estos autores como *Terra Preta* (tierra negra).

Según Lehmann (2009) y Lehmann et al. (2006), manifiestan el descubrimiento de partículas similares al carbón en suelos muy fértiles y de alto contenido en carbono del Amazonas en Brasil, denominados localmente como *Terra Preta do Indio* (tierra negra del Indio).

Las teorías acerca del origen antropogénico de las tierras negras también incluyen quema de los sitios, ya sea por incendios casuales o intencionales en el área, realizados para destruir

bosques con el fin de usarlos como tierras de cultivo y para eliminar la maleza (Woods y Glaser, 2004). Falcao (2012) consideró que dichos suelos fueron desarrollados por los indios mediante el depósito de materiales orgánicos, derivados de la quema de biomasa y restos de esqueletos de pescado, lo cual los transformaba en suelos fértiles al agregársele cierta riqueza de nutrientes. Glaser *et al.* (2001), también mencionan que las altas concentraciones de carbón pirogénico en la *Terra Preta* provinieron principalmente del carbón de cocina y restos de incendios y productos no combustibles.

Petersen *et al.* (2001) también coinciden en que la denominada *Terra Preta* es consecuencia de prácticas de manejo de suelos ancestrales y parecidos al carboneo de leña y otros restos de biomasa, llevadas a cabo por culturas indígenas anteriores a la colonización europea.

El estudio de esos suelos con alto contenido de carbón llevó a concluir que presentaban excelentes propiedades, entre las que podemos mencionar su elevada disponibilidad nutrimental y altos contenidos de humedad, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbológica (Lehmann y Joseph, 2009).

2.3.3. Proceso de producción

Fuentes de materia prima para su elaboración

Escalante *et al.* (2016) mencionan que los materiales usados para la elaboración de biochar o biocarbón son muy numerosos, y que dentro de los más citados en la literatura se tienen a los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz; los residuos de aceituna, desperdicios orgánicos de la vida urbana. Así mismo, Lehmann y Joseph (2009) y Brick (2010) también mencionan materias primas como estiércol, hojas, camas de aves, algas, cáscaras de naranja, de nueces y lodos residuales. Por otro lado, Escalante *et al.* (2016) remarca que el biocarbón es un producto factible de ser obtenido sólo donde hay suficiente biomasa disponible, tal es el caso de los subproductos de actividades agroforestales o residuos orgánicos urbanos, que pueden ser usados como materia prima.

Según Escalante *et al.* (2016), la factibilidad de la obtención del biocarbón podría llevarse a cabo directamente en el campo, aprovechando los residuos de las labores agrícolas, a los cuales bajo este enfoque se les confiere un valor agregado.

Son diversos los procesos para la obtención del biocarbón, principalmente se consideran las tecnologías termoquímicas para transformar la biomasa en fuentes de energía renovable.

Éstas pueden ser clasificadas, de acuerdo al tiempo en el que se queman, en cuatro categorías generales: pirólisis lenta, pirólisis rápida, pirólisis ultrarrápida y gasificación (Laird et al., 2009; Brick 2010; Ippolito *et al.*, 2011).

La pirólisis y sus tipos

Laird et al. (2009) definen la pirólisis como el proceso termoquímico usado para transformar biomasa y otros materiales orgánicos de baja densidad energética a: líquidos de alta densidad energética, conocidos como bio-aceites, a sólidos de alta densidad energética conocidos como biocarbón y a un gas de relativamente baja densidad energética conocido como gas de síntesis (syngas).

Roberts et al. (2010) mencionan que en la producción de biochar se utilizan dos sistemas de pirólisis: pirólisis rápida y pirólisis lenta. Ambos originan biochar, gas y bioaceite, siendo las cantidades relativas y las características de cada uno de los co-productos controladas por las condiciones de operación. Por otro lado, Moreno *et al.* (2007) indican que los sistemas de gasificación también se emplean en la producción de biochar; sin embargo, con este método se obtiene una menor proporción de biochar que en el proceso pirólisis, ya sea rápida o lenta.

Pirólisis rápida: La pirólisis rápida se caracteriza por velocidades de calentamiento elevadas y bajos tiempos de residencia. El material a alimentar debe presentar un tamaño de partícula pequeño y homogéneo, además, el diseño del reactor debe permitir una rápida evacuación de los vapores de la zona de sólidos calientes. Generalmente se alcanzan temperaturas alrededor de los 500 °C (temperatura moderada en términos de pirólisis) (Moreno *et al.*, 2007).

Pirólisis lenta: La pirólisis lenta se caracteriza por la utilización de bajas velocidades de calentamiento, y tiempos de residencia más largos. La temperatura suele ser inferior a la alcanzada en procesos de pirólisis rápida, normalmente 400 °C. El producto de interés es el residuo carbonoso, siempre acompañado por las fracciones líquida y gaseosa. (Moreno *et al.*, 2007).

Gheorghe *et al.* (2009) afirman que el proceso con el más alto rendimiento de biochar o biocarbón sería el de pirólisis lenta.

Teniendo en cuenta la técnica de pirólisis, la temperatura y el tiempo de residencia del material a pirolizar, se pueden obtener una cantidad diferente de cada uno de los productos resultantes, como se muestra a continuación en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Tipos de pirólisis y transformación de la materia prima inicial en subproductos pirolíticos.

Proceso	Temperatura de Pirólisis	Tiempo de residencia	Líquido (bioóleo)	Sólido (biochar)	Gas (syngas)
Pirólisis rápida	Moderada (~500°C)	Corto (<2s)	75% (25% agua)	12%	13%
Pirólisis lenta	Baja-moderada (450-650°C)	Largo	30% (70% agua)	35%	35%
Gasificación	Elevada (<800°C)	Largo	5% (5% agua)	10%	85%

Fuente: Sohi et al., 2009.

Tabla 2: Tipos de pirólisis y rendimientos típicos de productos.

	Condiciones	Líquido (%)	Sólido (%)	Gas (%)
Lenta	Temperatura moderada 500°C	30	35	35
Lenta	Tiempos de residencia del vapor largos 5-30 minutos	30	35	35
Moderada	Temperatura moderada 500°C	50	20	30
Moderada	Tiempos de residencia del vapor 10-20 s	50	20	30
Rápida	Temperatura moderada 500°C	75	12	13
Rápida	Tiempos de residencia del vapor cortos 1s	75	12	13
Gasificación	Temperatura alta >750°C	5	10	85
Gasificación	Tiempo de residencia del vapor 10-20s	5	10	85

Fuente: Adaptado de IEA (2007)

2.3.4 Propiedades físicas y químicas

Composición

Guerra (2015) señala que la composición del biochar varía de acuerdo al tipo de materia prima que se haya empleado. Sin embargo, el biochar está compuesto principalmente de carbono orgánico recalcitrante y de contenidos de macro y micronutrientes retenidos de la materia prima original. Así también, se encuentra compuesto por una concentración variada de otros elementos tales como oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S), cationes básicos, metales pesados y de compuestos orgánicos. Por otro lado, la composición dependerá también de las condiciones de pirólisis puesto que algunos contaminantes pueden formarse durante el proceso de producción, tal es el caso de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), formados a partir de cualquier materia carbonosa.

Caracterización

Césare *et al.* (2018b) realizaron la caracterización física y química del biochar elaborado a partir de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth y los resultados se muestran a continuación (Tablas 3, 4, 5 y 6):

Tabla 3: Análisis físico-químico del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth

T (°C)	pH	C.E (dS/m)	Densidad aparente	Porosidad (%)	Retención de agua (%)	CIC (meq/100g)
400	8.67	4.03	0.215	86.209	74.25	17
530	9.88	4.63	0.213	86.365	76.35	20

Fuente: Césare *et al.* (2018b)

Guerra (2014), señala que el pH del biochar depende del tipo de materia prima empleada, de su composición y de las condiciones de pirólisis. La alta concentración de carbonatos de potasio y, en menor relación, de carbonatos de calcio y magnesio presentes en la materia prima, y por ende, también en el biochar, le otorgan un efecto de encalado sobre el suelo y con ello la posibilidad de influir sobre la fertilidad del suelo y de disminuir la saturación de aluminio, particularmente para suelos ácidos altamente meteorizados que presentan altas concentraciones de óxidos de hierro y aluminio, los cuales tienen la característica de retener el fósforo y no dejarlo disponible para la planta.

Guerra (2014), en su investigación de elaboración de biochar mediante pirólisis lenta en horno pirolítico, encontró valores de pH desde 9.91 a 10.20 para el biochar de cáscara de cacao, de 8.28 a 8.76 para el biochar de hoja de palma aceitera, de 8.66 a 9.11 para el biochar de peciolo de palma aceitera y de 9.85 a 10.16 para el biochar de corteza externa de palmito. Los valores de conductividad eléctrica hallados en la investigación de Césare *et al.* (2018b), indican que el biochar producido es un material moderadamente salino, el cual podría tener un efecto adverso en la mayoría de las plantas por la excesiva cantidad de sales; sin embargo, Guerra (2014) menciona que, este efecto adverso podría verse reducido si el biochar es aplicado en suelos donde hay lluvias constantes y abundantes que lavan permanentemente los suelos.

Escalante *et al.* (2016), manifiesta, en relación a la capacidad de intercambio catiónico del biochar, que ésta es muy variable y va desde unas cuantas unidades hasta 40 cmol/kg (40 meq/100g) producto de su química superficial. Ésta propiedad cambia después de su incorporación a los suelos por interacciones con el ambiente edáfico.

Lehmann (2007), señala que la CIC puede ser muy baja cuando se usan bajas temperaturas en la pirólisis, pero se incrementa significativamente a temperaturas más altas.

Los resultados hallados por Césare *et al.* (2018b), se muestran en la Tabla 4, destacan la presencia de nutrientes asociados a la fracción mineral del biochar (K, Ca, Mg y P).

Tabla 4: Análisis químico del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth

T (°C)	M.O (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (g/100g)	CaO (%)	MgO (%)
400	4.98	1.31	5.59	0.21	0.26
530	9.69	0.52	3.37	0.13	0.28

Fuente: Césare *et al.* (2018b)

Como se puede observar en la Tabla 5, los resultados obtenidos por Césare *et al.* (2018b), reflejan una alta relación C/N, de 88 para el biochar producido a una temperatura de 400 °C y 137 para el biochar producido a 530 °C.

Los resultados obtenidos por Chan y Xu (2009), indican que la relación C:N (carbono a nitrógeno) en el biochar se encuentra entre 7 y 400 y por Escalante *et al.* (2016), quienes reportan valores de esta relación de 245 en un biochar elaborado a partir de cáscara de nuez.

Tabla 5: Análisis químico elemental del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth

T (°C)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	H/C	O/C	C/N
400	52.800	2.3731	8.6037	0.600	0.045	0.1629	88
530	80.552	2.4271	9.1263	0.588	0.030	0.1133	137

Fuente: Césare *et al.* (2018b)

Guerra (2014), en su trabajo de investigación, obtuvo una relación C:N de 43.31 para el biochar de cáscara de cacao, C:N de 59.47 para el biochar de hoja de palma aceitera, C:N de 166.55 para el biochar de peciolo de palma aceitera, C:N de 88.02 para el biochar de corteza externa de palmito, C:N de 150.48 para el biochar de raquis de palmito, C:N de 76.53 para el biochar de corteza interna de palmito, C:N de 119.84 para el biochar de cáscara de sachá inchi y una relación C:N de 108.18 para el biochar de cascarilla de arroz. Además, indica que el biochar es un material agotado en nitrógeno y con un alto contenido de carbono lo cual conlleva a una relación C:N alta y única.

Moreno *et al.* (2007) indican que la relación C:N se ha utilizado como indicador de la capacidad de los sustratos orgánicos para liberar N inorgánico cuando se incorpore en los suelos. Sullivan y Miller (2001), señalan que las relaciones C:N altas en el biochar causarían inmovilización de N y podrían causar deficiencia de N en las plantas; sin embargo, Chan y Xu (2009) indican que la mayor parte del biochar está formado por carbono altamente recalcitrante a la acción biológica y no es fácilmente mineralizable, por lo que la inmovilización del N por una alta relación C:N en el biochar es despreciable. Novak *et al.* (2010) concluyeron que el 58 por ciento del carbono del biochar se encuentra formando parte de estructuras aromáticas altamente condensadas, y una menor cantidad se presenta en forma alifática (29 por ciento) y carboxílica (13 por ciento), por lo que es poco probable que altere la biodisponibilidad de carbono en el suelo.

Por lo tanto, debido a su recalcitrancia, el uso del biocarbón como mejorador de suelos no conlleva un aumento de carbono lábil, por lo tanto, la relación C:N efectiva no aumenta, por lo que no se tiene un efecto adverso en la asimilación de nitrógeno por las plantas (Kimetu *et al.*, 2008).

Guerra (2014), indica que un ratio de O/C >0.2 y/o de un ratio de H/C >0.4 en el biochar, puede indicar una habilidad de secuestro de carbono moderada, mientras que un ratio de O/C <0.2 y/o un ratio de H/C <0.4 puede indicar un alto potencial de secuestro de carbono.

En las Tabla 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos por Césare *et al.* (2018b) y Césare *et al.* (2018a), respectivamente. Césare *et al.* (2018a) indican que, la temperatura es un factor importante en la producción de biochar debido a que le confiere ciertas características al biochar como lo es su alta estabilidad y esto se refleja en el contenido de carbono fijo de 74.05 por ciento y por consiguiente el bajo contenido de material volátil de 11.98 por ciento.

Tabla 6: Análisis termogravimétrico del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth

T (°C)	Materia Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbón Fijo (%)	Humedad (%)
400	12.02	8.715	73.97	5.295
530	8.05	4.039	85.812	2.099

Fuente: Césare et al. (2018b)

Tabla 7: Resultados de características del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth.

T°	Rendimiento (%)	Materia Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbón Fijo (%)
558.3°C	29	11.98	8.70	74.05

Fuente: Césare et al. (2018a)

McLaughlin *et al.* (2009), mencionan que, el porcentaje de material volátil es trascendental al aplicar el biochar al suelo, porque existe evidencia que esta fase gaseosa precipita dentro del suelo, proveyéndole una fuente de carbono soluble que podría causar una deficiencia de nutrientes a corto plazo, porque estimulara el crecimiento de microorganismos que competirán con la planta por el nitrógeno disponible y además, desaparece generalmente en una estación de crecimiento, lo cual no contribuye a mejorar las propiedades del suelo a largo plazo. Escalante *et al.* (2006), mencionan que el contenido de material volátil en el biochar es interpretado como el grado de susceptibilidad de este material a la degradación y también refieren que a mayor contenido de material volátil, será mayor la repelencia del biochar al agua.

Propiedades

Schmidt y Noack (2000) y Lehmann (2007) afirman que los componentes orgánicos que conforman la biomasa original influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, lo que define a su vez los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo.

Además, Moreno *et al.* (2007) mencionan que la materia prima para la elaboración de biochar es un factor clave, el cual regula el estado de sus propiedades físico-químicas.

La evaluación de las propiedades químicas de las muestras de biochar puede ser útil para conocer el proceso de envejecimiento, ya que ello se ha hecho en suelos con este tipo de tecnologías. Relaciones elementales O/C, O/H y H/C pueden ser de utilidad para proporcionar una medida fiable sobre la técnica de la pirólisis, en concreto sobre el nivel de oxidación y son relativamente fáciles de determinar. (Moreno *et al.* 2007).

Enders *et al.* (2012) han propuesto el uso del contenido de materia orgánica volátil (MOV) junto con la relación O/C o H/C para establecer la estabilidad del biochar. Una MOV por encima del 80 por ciento puede indicar un biochar sin capacidad de secuestro de carbono; una MOV por debajo de 80 por ciento junto con una relación O/C por encima de 0,2 o una relación H/C por encima de 0,4 puede indicar un secuestro de carbono moderado, mientras que si dichas relaciones están por debajo de 0,2 o 0,4, respectivamente, puede indicar que el biochar posee un alto potencial de secuestro de carbono.

La caracterización biogeoquímica también puede ayudar a entender la posible función agronómica del biochar a nivel del suelo y facilitar un proceso de producción de biochar que ofrezca beneficios específicos (Moreno *et al.* 2007). Okimori *et al.* (2003) han definido un conjunto preliminar de siete propiedades clave para la evaluación de biochar: pH, contenido de compuestos volátiles, contenido de ceniza, capacidad de retención hídrica, densidad aparente, volumen de poro y el área superficial específica. Así mismo, McLaughin *et al.* (2009) proponen un esquema de caracterización general del biocarbón en el cual consideran la determinación de: humedad, ceniza (sílice, Hierro, alúmina y materia no combustible), materia volátil o móvil y materia residente o recalcitrante (carbono fijado) que corresponde al sólido que queda después de que la materia volátil ha sido expulsada, pero no es carbono en su totalidad.

Okimori *et al.* (2003) manifiestan que la temperatura de pirólisis es el parámetro de proceso más importante, ya que el contenido de carbono en el biochar será inversamente proporcional con el propio rendimiento del biochar, aumentando del 56 al 93 por ciento al variar la temperatura entre 300 y 800 °C, mientras que el rendimiento de biochar se redujo de 67 a 26 por ciento.

El pH es una característica muy importante a considerar debido a que es un determinante directo sobre los efectos de la relación suelo-biochar-planta; además, el pH resultante dependerá de la materia prima original y de las condiciones operacionales (Lehmann citado por McElligot *et al.* 2011).

Ennis *et al.* (2012) estudiaron las características de los biochars, y señalaron también que dichos productos muestran una elevada capacidad de retención hídrica, debido a su composición química; también definen una amplia capacidad superficial para estos productos carbonados, así como una elevada capacidad de intercambio catiónico.

Al-Wabel *et al.* (2013) estudiaron los diferentes productos resultantes de la pirólisis cuando ésta se produce sobre residuos de *Conocarpus sp.* a diferentes temperaturas (desde 200 hasta 800 °C) para investigar su efecto sobre las características y la composición química de los biochars resultantes. Encontraron que con el incremento de la temperatura de pirólisis también aumentaron el contenido de cenizas, pH, conductividad eléctrica, grupos funcionales básicos, la estabilidad del carbono y el contenido total de C, N, P, K, Ca y Mg, mientras que el rendimiento en biochar, el contenido total de O, H y S, forma inestable de carbono orgánico y grupos funcionales de carácter ácido, disminuyeron.

Por otro lado, Martínez *et al.* (2006) mencionan que los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima original y permiten el transporte rápido de sorbatos, para su posterior difusión en el volumen de microporos, ayudando al transporte de moléculas concentradas. Con respecto a los microporos, Verheijen *et al.* (2010) afirman que son generados en el proceso de pirólisis, por lo que al aumentar la temperatura también aumenta la microporosidad y además generan más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y de gases.

2.4 Adopción del biochar en las prácticas agrícolas y ambientales

Moreno *et al.* (2007) mencionan que cuando se consulta la bibliografía existente sobre la temática, vemos que hay numerosas publicaciones acerca de los posibles efectos de la aplicación del biochar sobre el sistema suelo-planta, tanto sobre el rendimiento de los cultivos como sobre el ecosistema edáfico. No obstante, Sohi *et al.* (2009) manifiestan que el grado de conocimiento es muy reciente y a menudo los resultados son muy variables y

dependientes del tipo de experimento llevado a cabo, en particular cuando alguno de los efectos que se estudian proceden de la influencia “directa” del biochar sobre la planta, o “indirecta” a través de su aplicación a los suelos.

Según Ippolito *et al.* (2011), el biocarbón provoca cambios positivos en el suelo que favorecen sus propiedades y el crecimiento de los cultivos. Además, Escalante *et al.* (2016) afirman que de acuerdo con la revisión bibliográfica que realizaron, concluyen que: El uso del biocarbón es una tecnología que ha demostrado proveer beneficios al suelo, aumentando su fertilidad a través de su influencia en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Sohi *et al.* (2009) afirman que dentro los beneficios ligados a la producción y requerimiento de nutrientes, se ha encontrado que el biochar permite obtener igual rendimiento de cosecha con una dosis más baja de fertilización que aquellos cultivos en los cuales se aplica la dosis óptima de fertilización. Es por ello que, Moreno *et al.* (2007) sugieren que el objetivo de aplicación de biochar en suelos de cultivos no sería tanto para aumentar la producción, sino más bien para asegurar un equilibrio de las cosechas, frente a eventos climáticos como por ejemplo sequías.

La naturaleza y el mecanismo básico que explique las interacciones entre cosecha, tipo de suelo, tipo de materia prima para la producción de biochar, método de pirólisis y dosis de aplicación tiene que ser ampliamente estudiado para ganar capacidad de predicción en la aplicación de biochar en suelos, y así abrir la posibilidad de aplicación a escalas más amplias (Moreno *et al.* 2007).

Con relación a los efectos de nutrientes, Rondon *et al.* (2007) describieron un mayor rendimiento y mayor absorción de nitrógeno con biochar en los ensayos utilizando rábano, esto ha sido ratificado por otras investigaciones como las de Chan *et al.* (2007) y Chan *et al.* (2008). Al igual que en este tipo de estudios, Kimetu *et al.* (2008) afirman que los efectos positivos de rendimiento debido al biochar se deben en parte a la mejora sobre algunas funciones del suelo y no al efecto nutricional.

Según Downie *et al.* (2009), la incorporación de biochar al suelo puede alterar sus propiedades físicas como: textura, estructura, distribución del tamaño de poro, área superficie total y la densidad aparente, con repercusión en la aireación, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad de laboreo del suelo. Sin

embargo, podría darse el caso en el que las partículas de biochar que son muy pequeñas pueden bloquear parcial o totalmente la porosidad del suelo con la consecuente alteración de su estructura y la disminución de infiltración de agua.

Según De Gryze *et al.* (2010), al aplicar biocarbón al suelo se puede aumentar su permeabilidad al agua y se reduce la escorrentía y los costos de riego. Esta afirmación fue corroborada en suelos de Australia (Chan *et al.*, 2007) y el Reino Unido (Gathorne *et al.*, 2009) donde la aplicación de biocarbón mejoró la aireación del suelo e hizo más fácil el laboreo. Por otro lado, Granatstein *et al.* (2009) indican que cuando el biochar se ha usado con fines de encalado, el biocarbón ha mejorado el balance del pH. Las mejoras del suelo atribuidas a la adición de biocarbón incluye también el incremento en la retención de humedad, y la permeabilidad del aire (McLaughlin, 2009).

Escalante *et al.* (2016) mencionan que el biocarbón por lo general incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo y, por lo tanto, la retención de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , lo que probablemente se atribuye a su elevada superficie específica, alta carga superficial negativa y elevada densidad de carga, aspectos que no son frecuentemente desarrollados en los estudios sobre biochar.

Según Mazêk y Brownsort (2011), el nitrógeno de la biomasa original puede no estar realmente disponible. El fósforo generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biocarbón, y al solubilizarse queda disponible para las plantas. Lehmann *et al.* (2006) encontraron incrementos en la absorción por las plantas de P, K, Ca, Zn y Cu en cultivos tropicales en los cuales se había aplicado biochar.

Según Sohi *et al.*, (2009), indican que son tres los mecanismos propuestos que intentan explicar cómo el biochar permite aumentar la producción en cosechas: i) por la modificación directa de la química del suelo debido a la composición del biochar, ii) el biochar está conformado por superficies químicamente activas que permiten modificar la dinámica de los nutrientes del suelo o bien catalizan las reacciones útiles para la obtención de un suelo fértil, iii) modifica físicamente el suelo de manera que beneficia el crecimiento de las raíces y aumenta la retención de agua y nutrientes.

2.4.1 Dosis de aplicación

Moreno *et al.* (2007), menciona que se han venido realizando ensayos, encaminados a conocer el valor agronómico de suelos con biochar producido bajo condiciones de oxígeno cero, generándose a partir de diferentes materias primas como residuos de gallinaza (Chan *et al.*, 2008), y de residuos verdes (Chan *et al.*, 2007), usando plantas indicadoras (como por ejemplo el rábano) en experimentos en contenedores. También indican que, algunos estudios usaron tasas moderadas de adición de 5 a 15 toneladas por hectárea (sobre el 0,5 por ciento en masa del suelo) y otros estudios incluyeron tasas de adición, a modo de prueba, bastante más elevadas de 60 a 300 toneladas por hectárea, (entre 2 a 10 por ciento en masa), o incluso tasas más altas (en experimentos de maceta).

En otras investigaciones, como la de Lehmann *et al.* (2003) mencionan que en la literatura se han reportado cargas mayores a 140 toneladas por hectárea, Rondon *et al.* (2007) afirman que algunos trabajos con biochar han empleado cargas superiores a las 60 toneladas por hectárea; bajando el rendimiento al aumentar la dosis, lo que llevó a atribuir la respuesta positiva del cultivo a factores como el clima y el suelo. También, Escalante *et al.* (2016) manifiestan que se han usado dosis menores, de 5 a 50 toneladas por hectárea que, complementadas con una gestión correcta de fertilización, se obtuvieron efectos positivos sobre el rendimiento de cultivos.

Khan *et al.* (2015) recomiendan para aplicación como enmienda al suelo en investigaciones con biochar dosis de 2,5, 5 y 7,5 toneladas por hectárea. Iglesias (2018) empleó una dosis de 5 toneladas por hectárea para la aplicación de biochar (elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto) para evaluar la productividad del maíz en el austro ecuatoriano.

2.5 El maíz como cultivo indicador

Ferrini (1967) menciona que el maíz es una de las plantas que mejor responden a la aplicación de fertilizantes, su corto periodo vegetativo exige disponer de elementos nutritivos asimilables desde la emergencia y sobre todo desde las primeras etapas de crecimiento.

McCellan *et al.* (2007) probaron tratamientos con biocarbón, fertilización NPK y cal en un suelo infértil y usando maíz como cultivo indicador, el mejor tratamiento fue aquel sin biocarbón pero con fertilización NPK y cal.

Salcedo (2016) utilizó el maíz como cultivo indicador, específicamente la semilla del híbrido experimental 5 del Programa de Investigación y Proyección Social en Maíz de la Universidad Nacional Agraria La Molina, debido a su capacidad de extracción de nutrientes, velocidad de crecimiento y formación de materia seca a fin de observar los efectos de la fertilización nitrogenada.

En la ficha técnica del híbrido experimental – 05 (PMX-05), se menciona dentro de las principales características de esta variedad, su adaptación a la costa del Perú, un periodo vegetativo de 110 a 120 días, floración entre 60 a 80 días y la época de siembra de noviembre a marzo en costa central.

III. METODOLOGÍA

3.1 Lugar de ejecución

Se realizó en el Laboratorio de Pulpa y Papel, Vivero Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos, ubicados en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.2 Materiales

3.2.1 Materia prima

- Residuos del aprovechamiento de plantaciones forestales de 5 años de *Guadua angustifolia* Kunth en el distrito de La Florida, provincia de San Miguel, en el departamento de Cajamarca.
- El material de propagación de la especie *Zea mays* L. pertenece a un lote de semillas del área de maíz del Programa de Cereales y Leguminosas de la Universidad Nacional Agraria La Molina y corresponde al híbrido experimental – 05 (PM-X5), el cual está adaptado a la costa¹.
- Tierra de chacra procedente del campus de la UNALM.

3.2.2 Insumos

- Leña
- Fertilizantes:
 - Urea: CO (NH₂) – 46 por ciento de N
 - Superfosfato triple granulado: Ca (H₂PO₄)₂ – 46 por ciento de P₂O₅
 - Cloruro de Potasio: KCl – 60 por ciento de K₂O

3.2.3 Instrumentos y herramientas

- Termómetro infrarrojo tipo pistola de 550 °C
- Balanza digital de 210 g de capacidad

¹ Pozo, F. 2018. Procedencia de las semillas de *Zea mays* L. (Conversación). Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina

- Balanza digital de 30 kg de capacidad
- Medidor de contenido de humedad
- Vernier digital
- Molino de grano
- Tamiz de malla 32 ASTM
- Carretilla
- Pala cuchara
- Cernidor
- Vasos de precipitado de 50, 100 y 500 mL
- Pipeta de 10 mL
- Tijera de podar

3.2.4 Equipos

- Horno pirolítico artesanal de doble tambor²
- Estufa para secado 105 °C

3.2.5 Materiales complementarios

- Macetas de plástico
- Balde de 20 L
- Regla metálica de 60 y 100 cm
- Bolsas con cierre hermético
- Bolsas de papel
- Bolsas plásticas
- Plumón indeleble
- Cinta masking tape
- Platos de plástico

3.3 Metodología

Como se puede apreciar en la Figura 3, el trabajo de investigación consistió en 04 etapas: 1) Producción de biochar, 2) Aplicación del biochar, 3) Evaluación del suelo y el cultivo indicador y 4) Análisis estadístico.

² El horno pirolítico artesanal de doble tambor utilizado durante la investigación fue diseñado y fabricado en el marco de la tesis para optar el título de ingeniero zootecnista de Enmer Trujillo Aranda, titulada: "Producción y Caracterización de biocarbón a partir de residuos agrícolas avícolas".

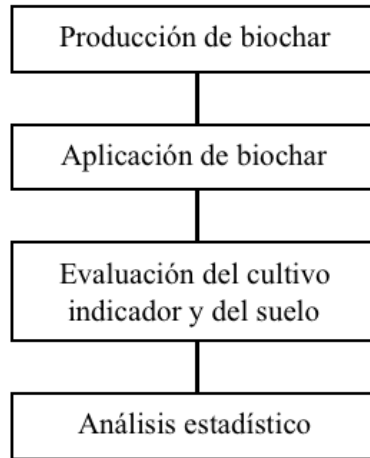


Figura 3: Etapas del trabajo de investigación.

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Producción de biochar

La etapa de producción de biochar consta de tres procedimientos generales, tal y como se muestra en la Figura 4.

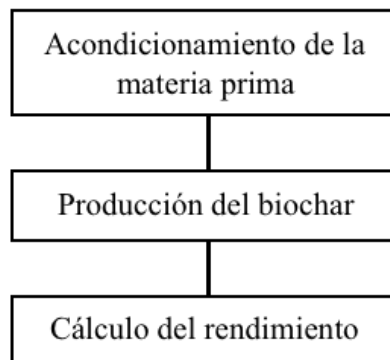


Figura 4: Procedimientos para la producción de biochar.

Fuente: Elaboración propia

Paso 1 Recolección de residuos (materia prima)

Los residuos fueron obtenidos del taller de laminado del Círculo de Investigación: para el desarrollo de la cadena de valor del bambú para el desarrollo científico y tecnológico (CIB), ubicado en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Paso 2 Acondicionamiento del material a pirolizar

Consistió básicamente en tomar el contenido de humedad y pesar los residuos de *G. Angustifolia* Kunth (ver Figuras 5, 6 y 7), los cuales serán colocados en el tambor pequeño para ser pirolizados, tal como se muestra en la Figura 8.



Figura 5: Medida del contenido de humedad externo.
Fuente: Elaboración propia



Figura 6: Medida del contenido de humedad interno.
Fuente: Elaboración propia



Figura 7: Pesado de residuos.
Fuente: Elaboración propia



Figura 8: Llenado del tambor pequeño.
Fuente: Elaboración propia

Paso 3 Llenado con material combustible

Consistió en colocar la leña en el espacio comprendido entre el tambor pequeño y el tambor grande para la combustión, como se observa en la Figura 9.



Figura 9: Colocación de la leña.
Fuente: Elaboración propia

Paso 4 Encendido del horno

Se colocó la tapa del tambor pequeño con el fin de asegurar la entrada mínima de oxígeno, luego se procedió a quemar la leña, como se puede apreciar en la Figura 10.



Figura 10: Puesta en marcha del proceso de pirólisis.
Fuente: Elaboración propia

Paso 5 Monitoreo continuo de la temperatura

Con ayuda de un termómetro infrarrojo tipo pistola (ver Figura 11), se fue tomando la temperatura que alcanza el sistema durante un periodo de 1.5 a 2.5 horas aproximadamente.



Figura 11: Monitoreo de la temperatura durante la pirólisis.
Fuente: Elaboración propia

Paso 6 Enfriamiento del horno

Una vez que ha terminado el proceso de pirolisis, fue necesario esperar entre 7 u 8 horas para poder retirar el biochar producido.

Paso 7 Rendimiento de la producción de biochar

Finalmente, se procedió a pesar el biochar producido (ver Figura 12) y así poder calcular el rendimiento del proceso con la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso del biochar producido (g)}}{\text{Peso de los residuos de bambú (g)}} \times 100\%$$



Figura 12: Pesado del biochar producido.
Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Aplicación del biochar

Esta etapa se realizó en el Vivero Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Durante esta etapa de la investigación se tuvo una temperatura promedio de 24 a 25°C y una humedad relativa del 68 a 69 por ciento (Fuente: SENAMHI – Dirección de Redes de Observación y Datos). Para la aplicación del biochar de bambú como enmienda orgánica, se siguieron los procedimientos que se muestran en la Figura 13.

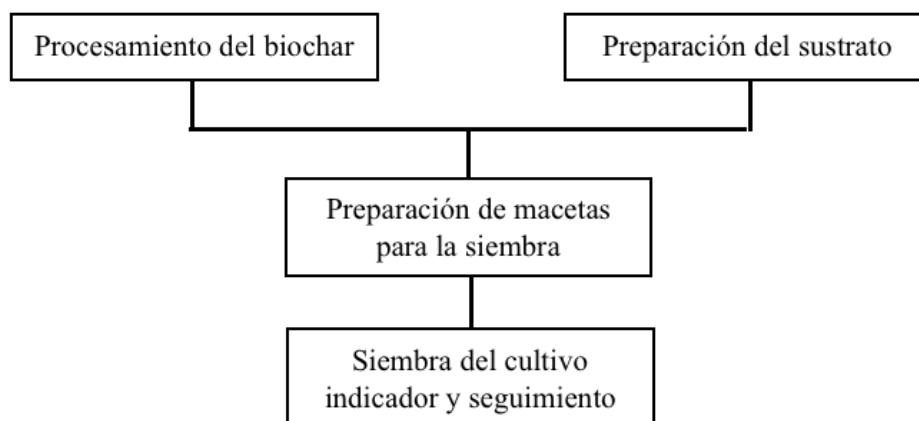


Figura 13: Procedimientos para la aplicación del biochar.
Fuente: Elaboración propia

Paso 1 Molienda del biochar producido

Se procedió a moler el biochar producido con ayuda de un molino de grano, como se puede apreciar en las Figuras 14 y 15.



Figura 14: Molino de grano.
Fuente: Elaboración propia



Figura 15: Molienda del biochar producido.
Fuente: Elaboración propia

Paso 2 Tamizado del biochar molido

Para el tamizado del biochar molido se utilizó un tamiz de malla 32 ASTM, con el fin de obtener partículas de un tamaño inferior a 0,5 mm, como se puede apreciar en la Figura 16.



Figura 16: Tamizado del biochar molido.
Fuente: Elaboración propia

Paso 3 Cálculo de la dosificación del biochar

Para el cálculo de la dosis de biochar a aplicar, se tuvo en cuenta experiencias previas e investigaciones. Es por ello que, teniendo en cuenta: i) la densidad aparente del sustrato (tierra de chacra) de 1,53 g/ml o 1 530 kg/m³, ii) una capa arable de 0.20 metros, iii) las dosis de aplicación en campo de 5, 10, 20 y 40 toneladas por hectárea, y iv) la capacidad de las macetas de 10 kg que se utilizaron, se determinaron las dosis de 20, 40, 80 y 160 g de biochar.

Una vez tamizado el biochar y conocida la dosificación, con ayuda de una balanza electrónica de precisión se prepararon las dosis de 20, 40, 80 y 160 g en 5 repeticiones para cada una (ver Figura 17). Luego, las dosis fueron colocadas en bolsas con cierre hermético a fin de conservarlas hasta el momento de su aplicación (ver Figura 18).



Figura 17: Pesado del biochar tamizado para la preparación de dosis.
Fuente: Elaboración propia



Figura 18: Dosis de 20, 40, 80 y 160 gramos de biochar.
Fuente: Elaboración propia

Paso 4 Preparación del sustrato a emplear: tierra de chacra

Primero se zarandeó la tierra de chacra a fin de separar piedras o materiales muy gruesos, tal y como se puede apreciar en la Figura 19.



Figura 19: Preparación del sustrato.
Fuente: Elaboración propia

Paso 5 Composición de los sustratos para el cultivo de *Zea Mays* L. en macetas

Los tratamientos que se evaluaron se observan en la Tabla 8.

Tabla 8: Tratamientos en evaluación

Tratamiento	Sustrato	Material Adicional	Codificación
T1	Tierra de Chacra (10Kg)	(testigo)	TEST
T2	Tierra de Chacra (10Kg)	Fertilizante N-P-K	FERT
T3	Tierra de Chacra (10Kg)	Biochar de Bambú (20g)	B-20
T4	Tierra de Chacra (10Kg)	Biochar de Bambú (40g)	B-40
T5	Tierra de Chacra (10Kg)	Biochar de Bambú (80g)	B-80
T6	Tierra de Chacra (10Kg)	Biochar de Bambú (160g)	B-160

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la dosis de fertilizante, se tuvo en cuenta las dosis recomendadas en la ficha técnica del Híbrido Experimental – 05 (PM-X5): 180 kg/ha de “N”, 200 kg/ha de “P” y 180 kg/ha de “K”. Es así que, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – 46 por ciento N: 0.35 gramos
- Superfosfato triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ – 46 por ciento P_2O_5 : 0.40 gramos
- Cloruro de potasio KCl – 60 por ciento K_2O : 0.35 gramos

Paso 6 Características del ensayo experimental

Cada tratamiento tuvo 05 repeticiones y las macetas se distribuyeron al azar, tal como se aprecia en las Figuras 20 y 21.

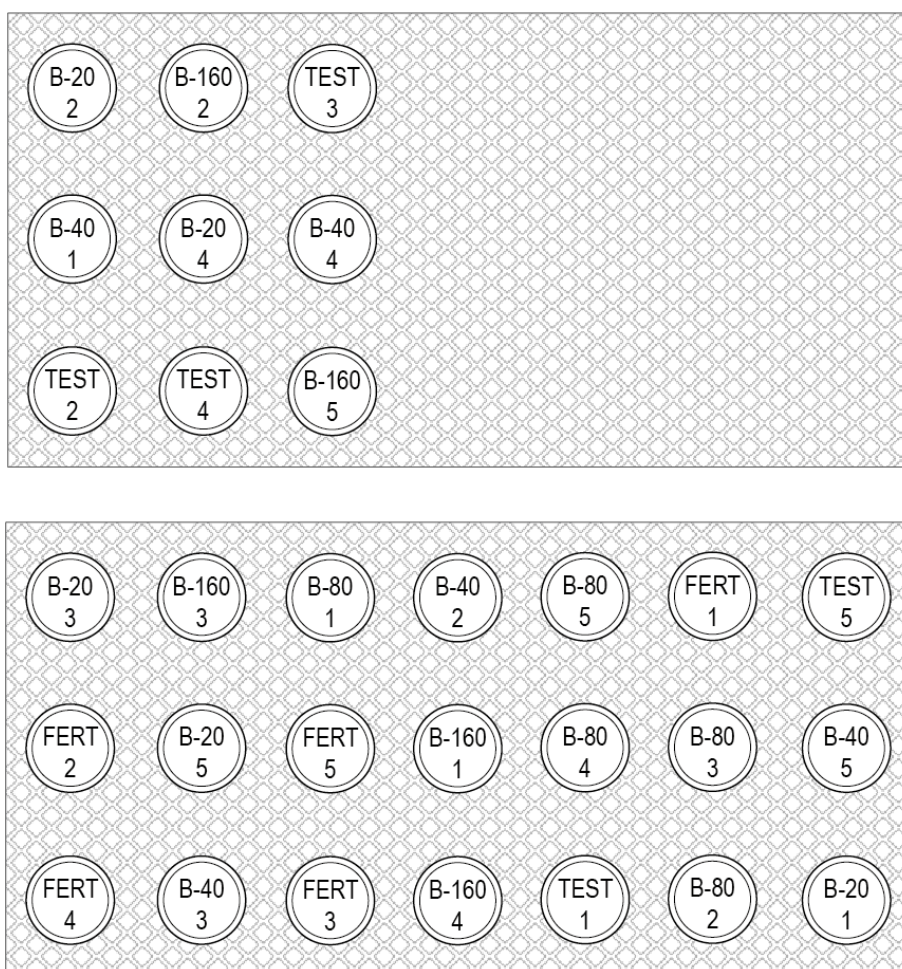


Figura 20: Distribución aleatoria de las 30 macetas del ensayo.
Fuente: Elaboración propia



Figura 21: Macetas del ensayo.
Fuente: Elaboración propia

Paso 7 Llenado de las macetas

Se procedió a llenar cada una de las 30 macetas con 10 kg de tierra de chacra, esta tierra fue previamente zarandeada, homogenizada y secada al aire (ver Figura 22). Durante este proceso se tomaron las medidas internas de la maceta para calcular el volumen que ocupan los 10 kg de tierra de chacra para obtener la densidad aparente del sustrato.



Figura 22: Llenado de las 30 macetas con el sustrato: tierra de chacra.
Fuente: Elaboración propia

Paso 8 Aplicación de dosis según tratamientos

En primer lugar se separan los 10 kg de tierra de chacra, en adelante sustrato, en dos recipientes: uno con 2 kg aproximadamente (20 por ciento) y el otro con 8 kg (80 por ciento). Posteriormente, en el recipiente que contiene la mayor cantidad de sustrato se agregó la dosis correspondiente, ya sea biochar o fertilizante, y se procedió a mezclar continuamente. Finalmente, se colocó la mitad del sustrato en el fondo de la maceta seguido de la mezcla y por último la cantidad restante de sustrato, con el fin de evitar que la mezcla quede expuesta en la superficie de la maceta (ver Figura 23).

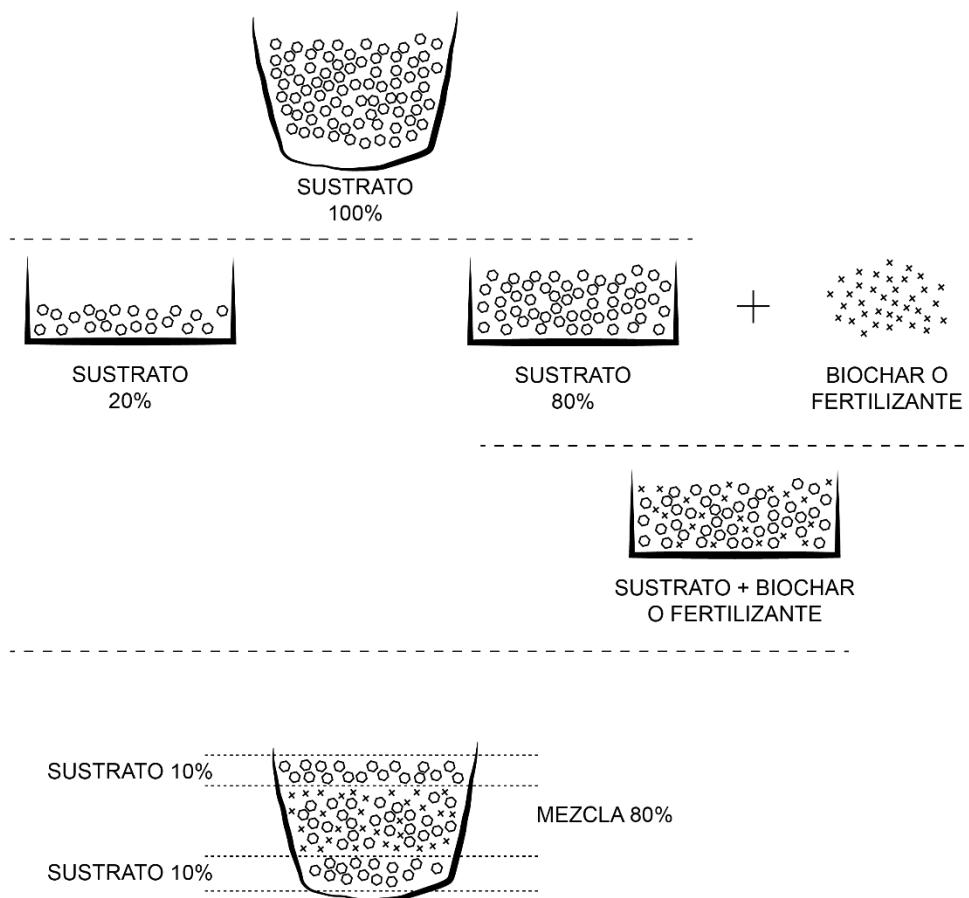


Figura 23: Aplicación de dosis correspondientes.

Fuente: Elaboración propia

Paso 9 Siembra de *Zea mays* L y seguimiento.

Se sembraron 05 semillas por cada maceta, tal y como se aprecia en la Figura 24.



Figura 24: Siembra de *Zea mays* L.
Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Evaluación del cultivo indicador y del suelo

La evaluación del cultivo indicador consistió básicamente en la evaluación del crecimiento, cálculo de la biomasa aérea, radicular y el posterior análisis foliar, como se muestra en la Figura 25.

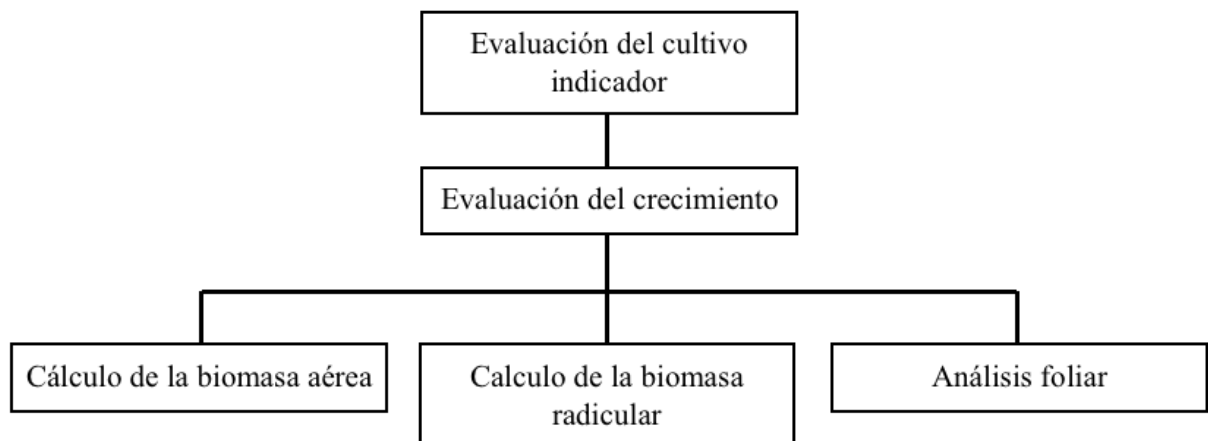


Figura 25: Procedimientos para la evaluación del cultivo indicador.
Fuente: Elaboración propia

Paso 1 Evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas de *Zea mays* L.

Se dio inicio a la evaluación semanal a las dos semanas de la siembra de semillas y consistió en la medición del grosor del tallo y la altura de las plantas de *Zea mays* L. según se muestra en las Figuras 26 y 27.



Figura 26: Medición del grosor de tallo con un vernier digital.
Fuente: Elaboración propia



Figura 27: Medición de la altura de las plantas.
Fuente: Elaboración propia

Paso 2 Biomasa aérea de las plantas de *Zea mays* L.

Primeramente se realizó la defoliación y se cortó a ras todas las plantas, a fin de obtener la biomasa aérea (ver Figura 28). Luego, se colocaron las hojas y tallos de las 5 plantas que se encuentran en cada maceta dentro de una bolsa de papel a fin de llevarlas a estufa a una temperatura de 75 °C por un periodo de 72 horas. Pasado este periodo de tiempo, se tomó el peso seco.

Paso 3 Biomasa radicular de las plantas de *Zea mays* L.

El contenido de suelo de cada maceta fue tamizado y se fue disgregando con suavidad los grumos a fin de obtener la mayor cantidad de raíces posibles. Luego, estas fueron lavadas para retirar la tierra que aún contenían y dejadas a secar al aire libre (ver Figuras 28 y 29). Después, se colocaron las raíces de cada maceta en una bolsa de papel y fueron llevadas a estufa a una temperatura de 75 °C por un periodo de 72 horas. Pasado este periodo de tiempo, se tomó el peso seco.

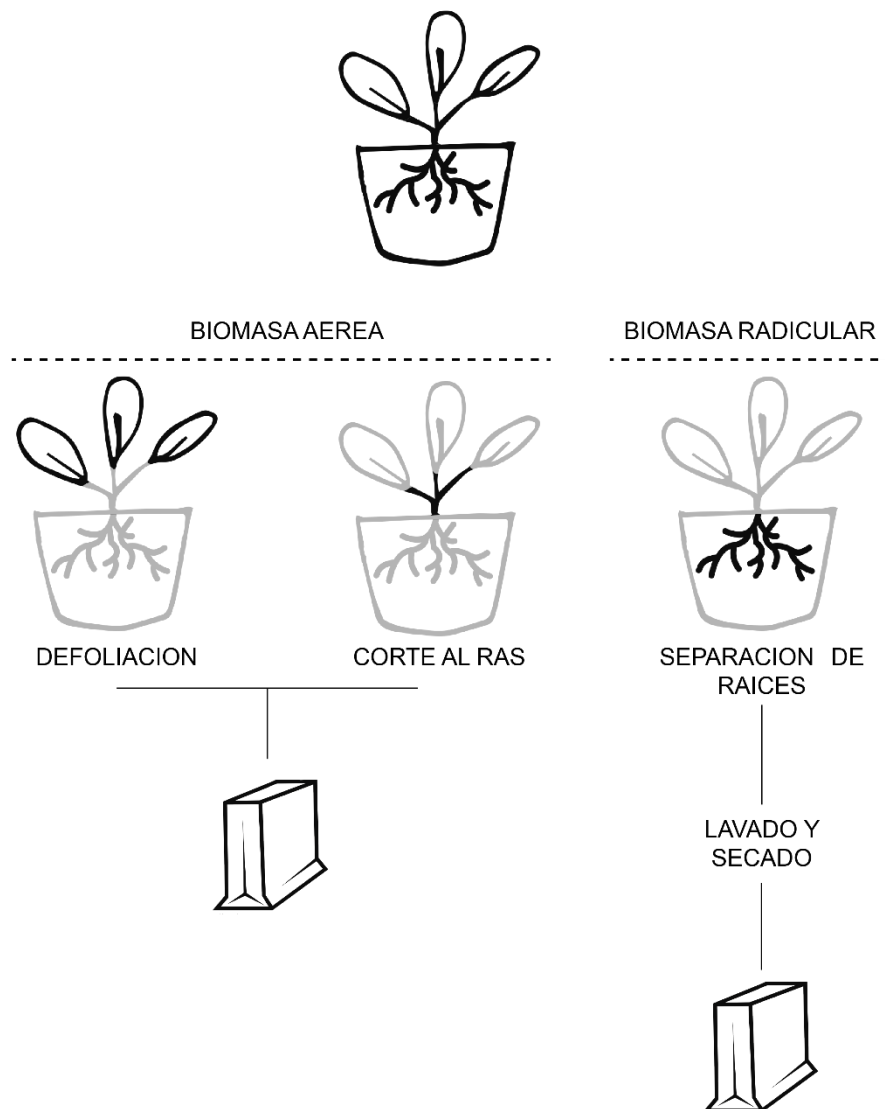


Figura 28: Cosecha de la parte aérea de las plantas.

Fuente: Elaboración propia



Figura 29: Obtención de la biomasa radicular de las plantas.
Fuente: Elaboración propia

Paso 4 Análisis foliar de las hojas de *Zea mays* L.

Una vez que se obtuvo el peso seco de la biomasa aérea, se procedió a tomar una muestra de hojas de cada una de las bolsas y fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina para cuantificar el contenido de nitrógeno (% N), fósforo (% P) y potasio (% K).

Paso 5 Evaluación de las propiedades físicas y químicas del sustrato

La evaluación de las propiedades físicas y químicas del sustrato se dio en dos momentos, el primero antes de los tratamientos y el segundo después de ellos (ver Figura 30).

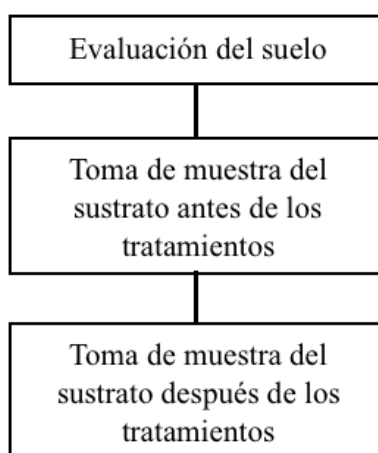


Figura 30: Momentos de la evaluación del sustrato.
Fuente: Elaboración propia

Toma de muestra del sustrato: tierra de chacra, antes de los tratamientos.

Una vez que se zarandeó y homogenizó la tierra de chacra, previo al llenado de las macetas, se procedió a tomar una muestra de 1 kg aproximadamente para su análisis en el Laboratorio de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Toma de muestra del suelo después de los tratamientos.

Una vez extraídas las raíces de cada una de las 30 macetas, se mezclaron las 05 macetas de cada tratamiento a fin de tomar una muestra de suelo por cada uno de los 6 tratamientos (ver Figura 31) y se llevaron al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina para su caracterización.



Figura 31: Toma de muestra de suelo para análisis de caracterización.
Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Análisis estadístico

El diseño experimental seleccionado fue un Diseño Completamente al Azar (D.C.A).

Para ello es necesario definir los términos del estudio:

Factor: Se trata de la variable independiente que afecta a los resultados del experimento.

- Dosis de aplicación de biochar de bambú:

20 gramos (5 tn/ha)

40 gramos (10 tn/ha)

80 gramos (20 tn/ha)

160 gramos (40 tn/ha)

Tratamiento: Corresponde a cada nivel del factor en estudio.

- T1: Testigo
- T2: Fertilizante N-P-K
- T3: Biochar de bambú (20 g)
- T4: Biochar de bambú (40 g)
- T5: Biochar de bambú (80 g)
- T6: Biochar de bambú (160 g)

Variables respuesta

- **Altura de planta:** Es la distancia vertical desde la base del tallo de la planta hasta la altura máxima que se alcanza agrupando todas las hojas en vertical hacia arriba.
- **Grosor de planta:** Es la longitud del ancho del tallo de la planta.
- **Biomasa aérea o Peso seco aéreo:** Peso de la parte aérea de la plántula luego de haber sido sometida al proceso de desecación.
- **Biomasa radicular o Peso seco radicular:** Peso de la parte radicular de la plántula luego de haber sido sometida al proceso de desecación.
- **Concentración de nitrógeno en hojas:** Obtenido mediante el método de Kjeldahl.
- **Concentración de fósforo en hojas:** Obtenido mediante el método del azul de molibdeno.
- **Concentración de potasio en hojas:** Obtenido mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Dato u observación: Es el registro numérico obtenido después de la aplicación de los tratamientos.

Se utilizó el análisis de variancias (ANVA) para la comparación de los datos obtenidos y, finalmente, para establecer el tratamiento que muestra mejores resultados, se realizó la prueba estadística Tukey.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Del proceso de producción de biochar

El biochar de bambú se produjo a través de pirólisis lenta, se utilizaron tiempos de residencia largos y una velocidad lenta de calentamiento pues el objetivo era la producción de biochar por encima de los otros co-productos de la pirólisis. El rango de temperatura del proceso estuvo entre 400 a 530 °C con un tiempo de residencia de 1.5 a 2.5 horas. Cabe resaltar que controlar la temperatura en este tipo de horno fue complicado ya que dependía de la alimentación de leña al sistema.

4.1.1 Rendimiento de la producción de biochar

Como se puede apreciar en la Tabla 9, el rendimiento promedio obtenido fue de 28.08 por ciento, este rendimiento es cercano al obtenido por Gutiérrez (2015) que oscila entre 30.07 y 31.66 por ciento en un horno tipo retorta en la producción de carbón vegetal de *Guadua angustifolia*. Otavio *et al.* (1987), que trabajaron a una temperatura máxima de 550 °C, obtuvieron un rendimiento de carbón vegetal de 32.7 por ciento para *Guadua angustifolia* Kunth; para la misma especie Gonzales (2002) obtuvo un rendimiento de carbón vegetal del 32 por ciento, a una temperatura máxima de 500 °C.

Tabla 9: Rendimiento de la producción de biochar con el uso de un horno pirolítico artesanal de doble tambor.

Repetición	Peso residuo (kg)	CH (%)			Peso biochar (kg)	Rendimiento
		Externo	Interno	Promedio		
1	2.493	25.2	16.2	20.7	0.657	26.35%
2	2.633	19.3	13.1	16.2	0.735	27.91%
3	2.742	18.1	13.4	15.75	0.773	28.19%
4	2.830	18.6	12.7	15.65	0.811	28.66%
5	3.125	16.4	12.8	14.6	0.915	29.28%

Fuente: Elaboración propia

Guerra (2015) encontró rendimientos de 17.8 por ciento para el biochar de raquis de las hojas de palmito con un C.H de 47 a 50.6 por ciento, 23.1 por ciento para el biochar de cáscara de cacao (C.H de 25 a 28 por ciento), 32.73 por ciento para el biochar de peciolo de palma aceitera (C.H de 33.8 a 57.6 por ciento), 37.8 por ciento para el biochar de cáscara de sachá inchi (C.H de 12.8 a 12.9 por ciento), y 41.2 por ciento para el biochar de cascarilla de arroz (C.H de 10.8 a 11.2 por ciento). Además, precisó que los rendimientos altos podrían deberse al bajo contenido de humedad que presentaban las materias primas como la cáscara de sachá inchi y la cascarilla de arroz, y al hecho de que el tamaño de partícula estándar podría facilitar la pirólisis.

El contenido de humedad de la materia prima empleada fue menor para la parte externa y mayor para la parte interna, con ambos valores se obtuvo un promedio, el cual osciló entre 14.6 y 20.7 por ciento. Los resultados obtenidos, corroboran lo encontrado por Guerra (2015) pues a medida que el contenido de humedad es menor, hay un mayor rendimiento en la producción de biochar.

4.1.2 Cálculo de la densidad aparente del biochar molido

Tabla 10: Densidad aparente del biochar de *G. angustifolia* Kunth molido y tamizado con una malla 32 ASTM.

Repetición	Volumen (ml)	Peso probeta y biochar (g)	Peso Probeta (g)	Peso biochar (g)	Densidad (g/mL)
1	5	55.573	54.148	1.425	0.2850
2	5	55.807	54.148	1.659	0.3318
3	5	55.242	54.148	1.094	0.2188
4	5	55.33	54.148	1.182	0.2364
5	5	55.474	54.148	1.326	0.2652
6	5	55.536	54.148	1.388	0.2776
7	5	55.446	54.148	1.298	0.2596
8	5	55.446	54.148	1.298	0.2596
9	5	55.465	54.148	1.317	0.2634
10	5	55.396	54.148	1.248	0.2496
11	5	55.367	54.148	1.219	0.2438
12	5	55.239	54.148	1.091	0.2182
13	5	55.504	54.148	1.356	0.2712
14	5	55.517	54.148	1.369	0.2738
15	5	55.332	54.148	1.184	0.2368

* Coeficiente de variabilidad: 10.98 por ciento

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se muestran en la Tabla 10, se asemejan a los encontrados por Gutiérrez (2015), que obtuvo valores entre 0,270 y 0,310 g/cm³ en la densidad aparente del carbón vegetal molido de *Guadua angustifolia* y tamizado por las mallas 40/60 ASTM.

Según Liu (2015), un buen sustrato es aquel material de textura media a gruesa, equivalente a una distribución del tamaño de partículas entre 0,25 mm y 2,5 mm, el cual retiene suficiente agua fácilmente y presenta un adecuado contenido de aire. Es por esta razón que se empleó un tamiz de malla 32 ASTM y se obtuvieron partículas de biochar con un tamaño inferior a 0,5 mm.

Guerra (2015), menciona que la densidad aparente del biochar se explica por su naturaleza porosa, pues presenta un amplio rango de tamaño de poros. A su vez, esta característica genera una elevada área superficial en el biochar.

McElligott et al. (2011) menciona que la densidad aparente del biochar es mucho más baja que la de los suelos minerales, pues el biochar normalmente presenta un valor promedio de 300 kg/m³ frente a 1,300 kg/m³. Además, Brady y Weil (2004) indican que, la aplicación del biochar podría reducir la densidad total del suelo, lo cual es una característica deseable para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Iglesias (2018), en su investigación realizada en el austro ecuatoriano, indica que, al disminuir la densidad aparente del suelo, aumenta la porosidad y ésta a su vez posee gran importancia en la penetración radicular, movimiento del agua y transporte de los nutrientes, difusión de los gases, etc. Por lo tanto, se podría inferir que la densidad obtenida del biochar molido de *Guadua angustifolia* Kunth y tamizado por una malla 32 ASTM, es adecuada para la aplicación al suelo.

4.2 De las propiedades físicas y químicas del suelo

4.2.1 Análisis de caracterización del sustrato antes y después de los tratamientos

Como se puede apreciar en la Tabla 11, la tierra de chacra empleada tuvo una textura franca, una capacidad de campo del 23 por ciento y una densidad aparente de 1.3697 g/cm³ (ver Tabla 12).

Tabla 11: Análisis de caracterización de la tierra de chacra al inicio – propiedades físicas.

Muestra	Análisis mecánico			Clase textural	Capacidad de Campo (%)
	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)		
	Tierra de chacra al inicio	38	36		

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes, UNALM. 2019

Tabla 12: Densidad aparente del sustrato tierra de chacra antes de los tratamientos.

Peso de la tierra de chacra (g)	Volumen que ocupan los 10 kg de tierra de chacra en la maceta (cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)
10 000 g	7 301 cm ³	1.37 g/cm ³

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, cuando se realizó el análisis de la capacidad de campo al final de los tratamientos, se obtuvieron resultados inferiores a la inicial (ver Tabla 13). Estos resultados pueden ser explicados por dos razones: en primer lugar, debido a que la muestra llevada y analizada en el laboratorio ha sido alterada por distintos procesos, lo cual dificulta la confiabilidad de los resultados y no permite su análisis y en segundo lugar, es posible que al tratarse de una muestra compuesta del sustrato de las 05 repeticiones para cada tratamiento, genero una mayor variabilidad.

Tabla 13: Análisis de capacidad de campo del sustrato al final de los tratamientos.

Muestra	Capacidad de Campo (%)
TEST	19.80
B20	20.09
B40	20.21
B80	19.90
B160	20.46
FERT	19.45

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes, UNALM. 2019

Lo más recomendable hubiese sido evaluar la capacidad de campo y la densidad aparente del suelo, antes y después de los tratamientos, *in situ* usando el método del cilindro. Sin embargo, este hecho hubiese disturbado las macetas debido a que al finalizar los tratamientos se evaluó la biomasa radicular, es por esta razón que no se pudo realizar.

Tabla 14: Caracterización del sustrato al inicio y al final de los tratamientos – propiedades químicas.

Muestra	CE		CaCO ₃ (%)	M.O (%)	P (ppm)	K (ppm)	CIC meq/100g	Cationes cambiabiles				
	PH (1:1)	dS/m						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H ⁺
INICIAL	7.69	2.37	2.2	0.61	5.9	153	16.32	11.34	2.98	0.72	1.27	0
FINAL												
TEST	7.82	1.58	2.4	0.77	7.9	124	13.44	9.39	2.53	0.51	1.01	0
B20	7.56	1.91	2.3	0.88	9.0	135	14.4	10.57	2.32	0.61	0.9	0
B40	7.81	1.44	2.4	0.77	20.8	154	13.12	8.88	2.58	0.65	1.01	0
B80	7.73	1.62	2.3	0.77	9.6	163	12.32	7.75	2.73	0.68	1.16	0
B160	7.80	2.18	2.4	0.81	10.9	216	12.32	7.65	2.75	0.82	1.1	0
FERT	7.77	1.34	2.3	0.76	10.7	124	13.6	9.65	2.52	0.5	0.93	0

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes, UNALM. 2019

En la Tabla 14 se muestra la caracterización de la tierra de chacra inicial con la que se prepararon las macetas, ésta era ligeramente alcalina (pH 7.69) y ligeramente salina (CE 2.37 dS/m). Además, posee una fertilidad natural baja (“M.O” 0.61 por ciento, “P” 5.9 ppm y “K” 153 ppm), lo cual fue provechoso para la investigación pues se tuvo 01 tratamiento que fue fertilizado con N-P-K, 04 tratamientos con diferentes dosis de biochar de bambú y 01 tratamiento testigo.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos en el análisis de caracterización de la tierra de chacra, se obtuvieron las siguientes cantidades: 1.525 g de nitrógeno disponible, 0.059 g de fósforo disponible y 1.53 g de potasio disponible (ver Tabla 15).

Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos en la caracterización del sustrato posterior a los tratamientos, se realizaron los cálculos para obtener la reserva de nutrientes de cada uno de los tratamientos, los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15: Reserva de nutrientes para cada tratamiento en evaluación.

Tratamiento	Reserva de nutrientes (10kg de sustrato)		
	N (gramos)	P (gramos)	K (gramos)
ANTES	1.525	0.059	1.53
FERT	1.900	0.107	1.24
B-160	2.025	0.109	2.16
B-80	1.925	0.096	1.63
B-40	1.925	0.208	1.54
B-20	2.200	0.09	1.35
TEST	1.925	0.079	1.24

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos para la reserva de nutrientes en todos los tratamientos, las cantidades de nitrógeno y fósforo fueron superiores a los que se obtuvieron en la tierra de chacra al inicio. Para el caso del potasio, se obtuvieron valores superiores a los iniciales en todos los tratamientos en los que se aplicó biochar, excepto para el tratamiento con 20 gramos.

Glaser *et al.*, (2000), indican que dentro de los aspectos estudiados alrededor de la aplicación del biochar son el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en parte por la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua. Así mismo, Major (2010) habla también de la capacidad de este material para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados.

Estos resultados, indicarían que la respuesta del biochar no es inmediata para la asimilación de nutrientes, si no que más bien, es a partir de las mejoras en las características físicas del suelo es que contribuye con el crecimiento y desarrollo de las plantas.

4.3 Respuesta de la aplicación del biochar y el crecimiento y desarrollo del cultivo indicador

4.3.1 Germinación

Las semillas proporcionadas por el programa de maíz, correspondientes al híbrido experimental 5 (PM-X5), tuvieron una germinación del 100 por ciento a los 5 días de haber

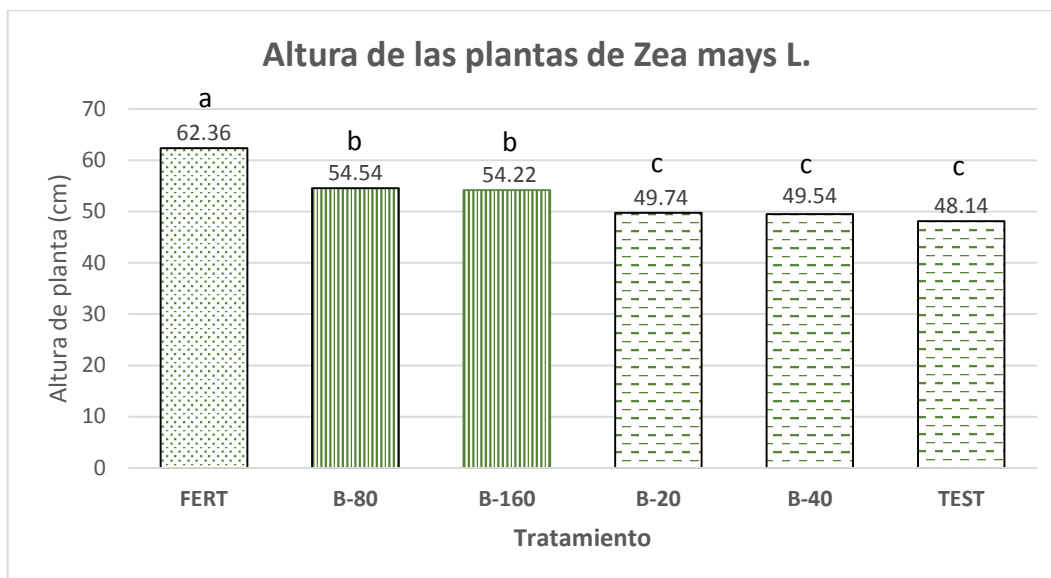
sido sembradas. Este resultado, constituye una prueba preliminar que muestra indicios de que la aplicación de biochar de bambú no produce efectos inhibidores en la germinación de *Zea mays L.* (maíz), de manera similar, Paco (2012) también concluyó en su investigación que la adición de las distintas enmiendas en forma de biochar al suelo no conllevan efectos inhibidores en la germinación, crecimiento y producción de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*).

4.3.2 Altura de plantas

El tratamiento que obtuvo mejores resultados en cuanto al crecimiento en altura de las plantas fue en el que se aplicó fertilizante (FERT), seguido del tratamiento B-80 (80 g de biochar) y luego el tratamiento B-160 (160 g de biochar), tal y como se aprecia en la Figuras 32 y 33.



Figura 32: Macetas representativas de cada tratamiento.
Fuente: Elaboración propia



* Coeficiente de variabilidad: 9.01 por ciento

Figura 33: Efecto de los tratamientos sobre la variación de la altura del maíz.

Fuente: Elaboración propia

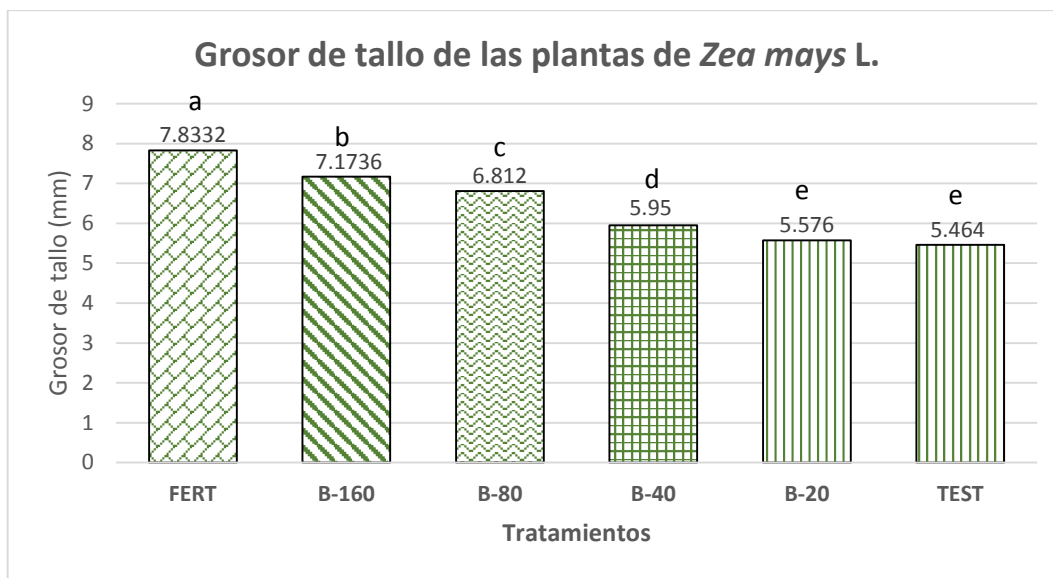
Los promedios de altura de planta varían entre 48.14 cm y 62.36 cm, tal y como se aprecia en la Figura 33.

Al realizar la prueba estadística de Tukey, sí se encontraron diferencias significativas por efecto de las dosis. Como se puede apreciar en la Figura 33, el tratamiento que obtuvo mejores resultados fue en el que se aplicó fertilizante, seguido de los tratamientos B-80 y B-160 entre los cuales no hay diferencia significativa y finalmente los tratamientos B-40, B-20 y TEST (testigo) entre los cuales tampoco se encontraron diferencias significativas.

Por lo tanto, para la altura de planta, se pudo ver que la tendencia en general fue mayor para el tratamiento fertilizado, seguido por los tratamientos con biochar y finalmente el testigo. Además, a medida que se aumenta la dosis de biochar, se observa que la altura de planta se acerca al comportamiento del tratamiento fertilizado, lo cual podría indicar que la adición de biochar de bambú sí aporta al crecimiento de la planta en altura.

4.3.3 Grosor de tallo

Los promedios de grosor de tallo varían entre 5.464 mm y 7.832 mm, tal y como se aprecia en la Figura 34.



* Coeficiente de variabilidad: 6.79 por ciento

Figura 34: Efecto de los tratamientos sobre la variación del grosor del tallo del maíz.

Fuente: Elaboración propia

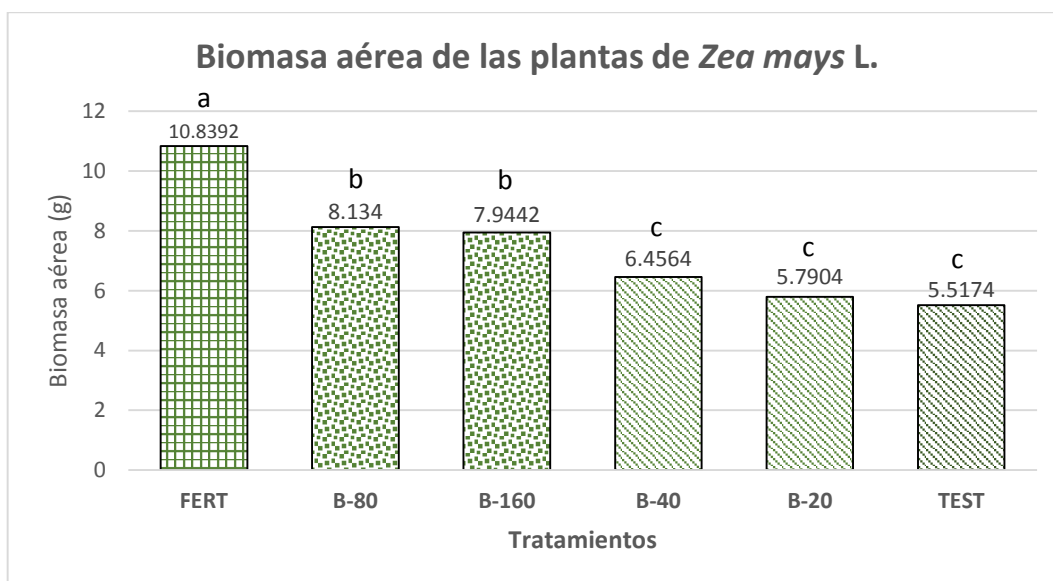
Como se muestra en la Figura 34, el tratamiento que obtuvo mejores resultados en cuanto al crecimiento en grosor del tallo de las plantas fue en el que se aplicó fertilizante, seguido de los tratamientos B-80 (80 gramos de biochar) y luego el tratamiento B-160 (160 gramos de biochar).

Al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, pudiéndose determinar, tal y como se observa en la Figura 34, el tratamiento con fertilizante fue el mejor, seguido de los tratamientos B-160, B-80 y B-40 y finalmente los tratamientos B-20 y el testigo, entre los cuales no hay diferencia significativa.

Para el grosor de tallo, al igual que para la altura de planta, se pudo ver que la tendencia en general fue mayor para el tratamiento fertilizado, seguido por los tratamientos con biochar y finalmente el testigo. Además, a medida que se aumenta la dosis de biochar, se observa que el grosor de tallo se acerca al comportamiento del tratamiento fertilizado, lo cual podría indicar que la adición de biochar de *Guadua angustifolia* Kunth sí aporta al desarrollo del tallo.

4.3.4 Biomasa aérea de las plantas de *Zea mays* L.

Los promedios de biomasa aérea en materia seca por tratamiento varían entre 5.5174 g y 10.8392 g, como se aprecia en la Figura 35.



* Coeficiente de variabilidad: 4.49 por ciento

Figura 35: Efecto de los tratamientos sobre la biomasa aérea de las plantas.
Fuente: Elaboración propia

Al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pudiéndose determinar que el tratamiento con fertilizante fue el mejor, seguido de los tratamientos B-80 y B-160 entre los cuales no hay diferencia significativa y finalmente los tratamientos B-40, B-20 y el testigo entre los cuales tampoco se encontraron diferencias significativas.

Por lo tanto, dentro de los tratamientos que propician la formación de biomasa aérea de las plantas de *Zea mays* L. se tiene en primer lugar al tratamiento fertilizado esto debido a la acción del nitrógeno en la formación de biomasa (Iglesias, 2018), lo cual podría indicar que la adición de biochar de bambú es determinante en los resultados de biomasa aérea. Estos resultados son coincidentes con los encontrados en los análisis anteriores de altura de planta y grosor de tallo.

Además, Paco (2012) concluye en su investigación que la aplicación de los biochar procedentes de la pirólisis lenta han permitido obtener una mayor biomasa aérea, lo que sugiere que han contribuido a una mayor eficiencia en la nutrición de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*).



Figura 36: Macetas testigo y fertilizado con el tratamiento B-160.
Fuente: Elaboración propia

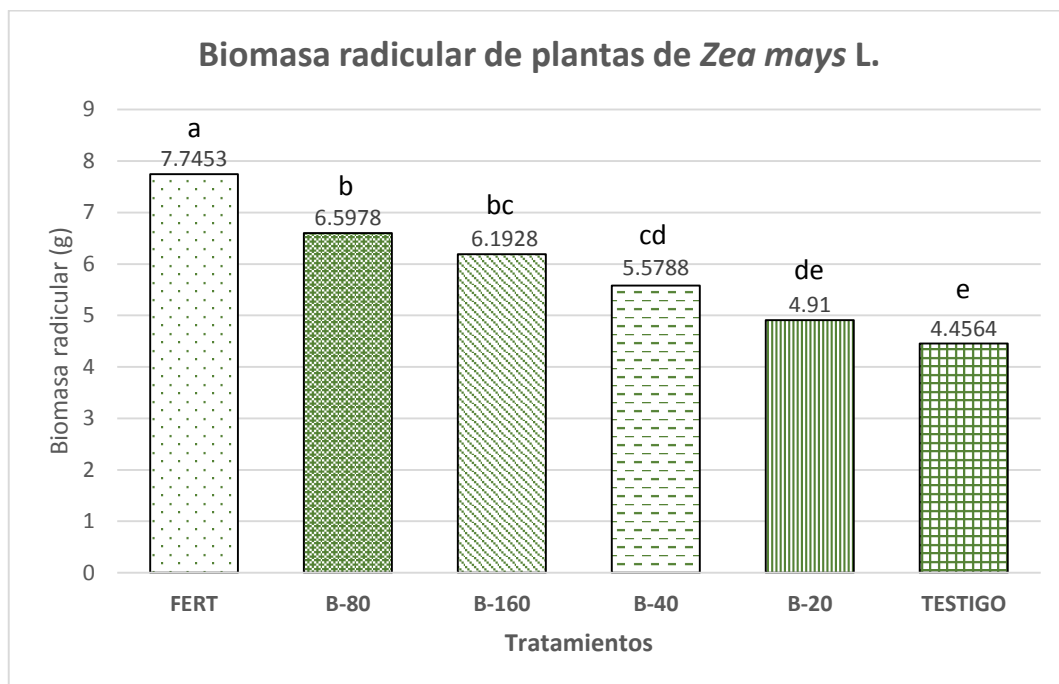


Figura 37: Macetas testigo y fertilizado con el tratamiento B-20.
Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 36 y 37 se puede apreciar la comparación entre las macetas de los tratamientos fertilizado y testigo, contra las macetas de los tratamientos donde se aplicó 160 y 20 g de biochar de bambú.

4.3.5 Biomasa radicular de las plantas de *Zea mays* L.

En la Figura 38 se muestra la significancia entre los tratamientos, después de realizar la prueba estadística de Tukey, donde se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pudiéndose determinar que el tratamiento con fertilizante fue el mejor, seguido de los tratamientos B-80, B-160, B-40, B-20 y el testigo respectivamente.



* Coeficiente de variabilidad: 8.60 por ciento

Figura 38: Efecto de los tratamientos sobre la biomasa radicular de las plantas de maíz.

Fuente: Elaboración propia

Al igual que para la biomasa aérea, dentro de los tratamientos que propician la formación de biomasa radicular de las plantas de *Zea mays* L. se tiene en primer lugar al tratamiento fertilizado esto debido a la acción del nitrógeno en la formación de biomasa, como menciona Iglesias (2018).

Para el caso de los tratamientos en los que se aplicó biochar, la tendencia muestra un aumento de la biomasa radicular a medida que aumentamos la dosis de biochar. Estos resultados son coincidentes con los encontrados en los análisis anteriores de altura de planta, grosor de tallo y biomasa aérea. Además, Brady y Weil (2004) indican que, la aplicación del biochar podría reducir la densidad total del suelo, lo cual es una característica deseable para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Además, Iglesias (2018) indica que al disminuir la densidad

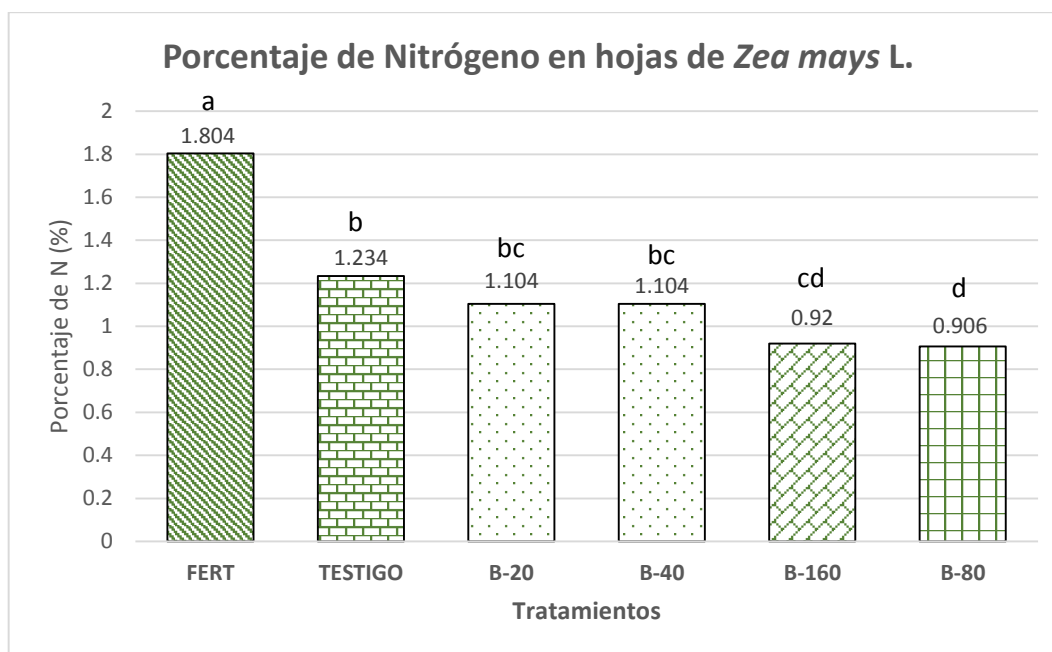
aparente del suelo aumenta la porosidad y a su vez la porosidad del suelo posee una gran importancia en la penetración radicular. Sin embargo, Paco (2012) no encontró un mayor desarrollo del sistema radicular de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*) como consecuencia del aporte de biochar.

De manera general, con los resultados obtenidos en cuanto al crecimiento y desarrollo de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), estarían acordes a los encontrados por Paco (2012) donde concluye que, los biochar ensayados provocaron efectos favorables en el suelo que han facilitado un mayor desarrollo de las plantas en comparación con la aplicación de sus respectivas materias primas.

4.3.6 Análisis foliar de las hojas de *Zea mays* L.

Concentración de nitrógeno en hojas de *Zea mays* L.

Al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pudiéndose determinar que el tratamiento con fertilizante fue el que obtuvo la mayor concentración de nitrógeno, seguido del tratamiento testigo, luego los tratamientos B-20 y B-40 entre los cuales no hay diferencia significativa, después el tratamiento B-160 y finalmente el B-80 (ver Figura 39).



* Coeficiente de variabilidad: 11.61 por ciento

Figura 39: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de N en las hojas del maíz.

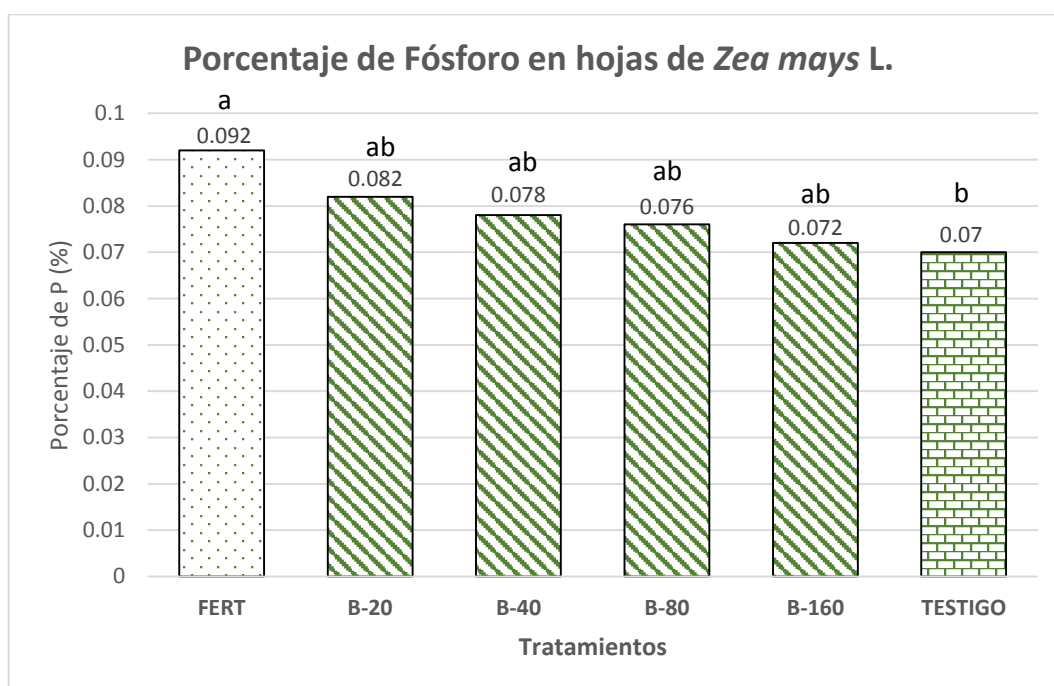
Fuente: Elaboración propia

Existen reportes que indican que el biocarbón puede retener temporalmente nitrógeno soluble en su estructura y liberarlo más lentamente que los productos inorgánicos, incrementando así la eficiencia de este elemento y la productividad de los cultivos (Zheng *et al.*, 2013).

Además, es importante tener en cuenta que la respuesta de la aplicación del biochar al suelo, tanto en la asimilación de nutrientes por la planta como en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, no es inmediata o al menos no se evidencia a corto plazo.

Concentración de fósforo en hojas de *Zea mays* L.

Al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pudiéndose determinar que el tratamiento con fertilizante fue el que obtuvo la mayor concentración de fósforo, seguido de los tratamientos B20, B-40, B-80 y B-160 entre los cuales no hay diferencia significativa; y finalmente el tratamiento testigo (ver Figura 40).



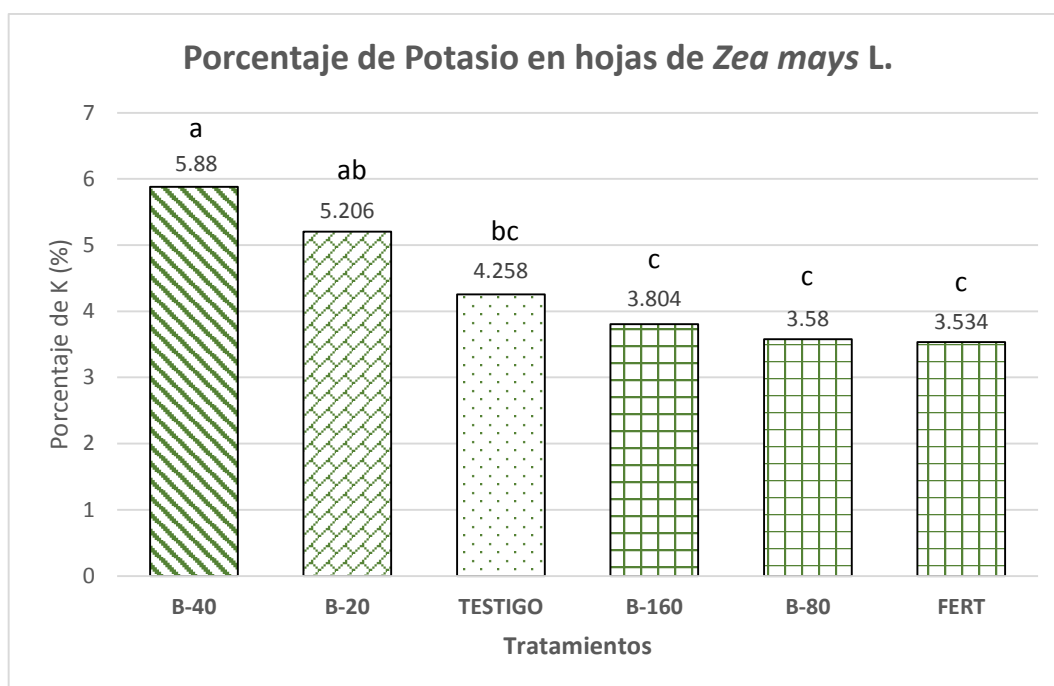
* Coeficiente de variabilidad: 13.89 por ciento

Figura 40: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de P en las hojas de maíz.

Fuente: Elaboración propia

Concentración de potasio en hojas de *Zea mays* L.

Al realizar la prueba estadística de Tukey, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pudiéndose determinar que el tratamiento B-40 fue el que obtuvo mayor concentración de potasio, seguido de los tratamientos B-20 y el testigo; y finalmente los tratamientos B-160, B-80 y el fertilizante, entre los cuales no se encontraron diferencias significativas (ver Figura 41).



* Coeficiente de variabilidad: 13.39 por ciento

Figura 41: Efecto de los tratamientos sobre la concentración de K en las hojas del maíz.

Fuente: Elaboración propia

Tanto para los resultados obtenidos para la concentración de fósforo “P” como para la de potasio “K” en las hojas de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), coinciden con los resultados obtenidos por Lehmann *et al.* (2006), quienes encontraron incrementos en la absorción por las plantas de P, K, Ca, Zn y Cu en cultivos tropicales en los cuales se había aplicado biochar.

V. CONCLUSIONES

1. La aplicación del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth al suelo es una estrategia sostenible por aprovechar residuos de plantaciones forestales, por su potencial contribución con la mejora de las condiciones estructurales del suelo y como agente generador de condiciones favorables para la asimilación de nutrientes para las plantas.
2. Tanto para las propiedades físicas y químicas del suelo no se observaron cambios significativos, debido al corto tiempo de interacción entre el biochar y el suelo.
3. La reserva de nutrientes para nitrógeno y fósforo que se tendrían con la aplicación de diferentes dosis de biochar son superiores a las reservas del sustrato inicial. Para el caso de la reserva de Potasio, se tendrían valores superiores con las dosis de aplicación de 40, 80 y 160 g de biochar.
4. La aplicación del biochar en diferentes dosis ha provocado efectos favorables en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Con las dosis de aplicación de biochar de 80 g (0.80 por ciento) y 160 g (1.60 por ciento) se consiguieron incrementos significativos en la altura y el grosor de tallo de las plantas de maíz híbrido experimental 5 (PM-X5); sin embargo, estos incrementos fueron inferiores al tratamiento fertilizado. La biomasa aérea y radicular fue mayor para los tratamientos con biochar y el tratamiento fertilizado, demostraron los mejores resultados.
5. La concentración de nitrógeno y fósforo en hojas fue mayor utilizando el tratamiento fertilizado; sin embargo, la mayor concentración de Potasio en hojas fue utilizando el tratamiento con 40 g de biochar de *Guadua angustifolia* Kunth.

VI. RECOMENDACIONES

- La producción de biochar usando el horno pirolítico artesanal de doble tambor constituye un método que puede ser replicado de manera efectiva en las zonas rurales donde haya plantaciones forestales de *Guadua angustifolia* Kunth y se puedan aprovechar los residuos de las mismas.
- En cuanto al tamaño de partícula ideal para la aplicación del biochar, se deberían realizar más estudios a fin de obtener rangos óptimos de tamaño de partícula, a fin de favorecer la retención de humedad y una buena aireación en el suelo o sustrato.
- Realizar el análisis de caracterización de suelos a una mayor cantidad de muestras a fin de poder realizar pruebas estadísticas con los resultados de dichos análisis.
- Realizar pruebas para determinar la densidad aparente y capacidad de campo del sustrato *in situ* (por ejemplo, método del cilindro). Ello a fin de obtener datos confiables y que no generen variabilidad.
- La dosis que presenta mejores condiciones de crecimiento de las plantas de maíz es de 80 g de biochar por cada 10 kg de sustrato, seguida de la dosis de 160 g teniendo en cuenta los efectos residuales del biochar a mediano y largo plazo.
- Se podría emplear el biochar de *Guadua angustifolia* Kunth como insumo adicional al sustrato convencional en la producción en vivero de esta misma especie, esto debido a que es una gramínea al igual que el maíz (*Zea mays* L.)
- Se recomienda elaborar biochar de otro tipo de biomasa residual a fin de otorgarle un valor agregado.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Al-Wabel, M. I.; Al-Omran, A.; El Nagger, A. H.; Nadem, M. & Usman, A.R.A. (2013). Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*. 131: 374-379. doi: 10.1016/j.biortech.2012.12.165
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2004). *Elements of the nature and properties of soils* (2° ed.). New Jersey, USA : Pearson Prentice Hall. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Brick, S.; Winsconsin, M. (2010). *Biochar: Assessing the promise and risks to guide U.S. policy*. Natural Resources Defense Council. USA. Recuperado de http://www.nrdc.org/energy/files/biochar_paper.pdf
- Campos, R. J.; Peñaloza, W. R.; Kahler, C.; Poblete, H. & Cabrera, J. (2003). *Bambú en Chile*. Santiago, Chile : INTEC. Recuperado de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/690>
- Césare, M. F.; Zamora, G. P. & Gonzales, H. E. (2018a). Biochar: Valorización de residuos orgánicos provenientes de la biomasa residual de la elaboración de tablillas de bambú *Guadua angustifolia*. *BAMBUCYT: Bambú para la ciencia, innovación y tecnología*, 2: 25-28.
- Césare, M. F.; López, L. A.; Zamora, G. P. & Gonzales, H. E. (noviembre, 2018b). Producción de biochar a partir de residuos de bambú (*Guadua angustifolia*). Simposio llevado a cabo en el Congreso Binacional del Bambú Perú – Ecuador, Piura, Perú.
- Césare, M. F. (2019). Caracterización física y química del bambú (*Guadua angustifolia*) para posibles usos energéticos [videoconferencia]. Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural - REBIBIR. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=nGmySO9jH34>
- Chan, K.Y. & Xu, Z. (2009). Biochar: nutrient properties and their enhancement. En: Lehmann, J., Joseph, S (Eds.), *Biochar for environmental management: science and technology* (67-84). Earthscan, United Kingdom : Dunstan house.

- Chan, K. Y.; Van Zwieten, L.; Meszaros, I.; Downie, A. & Joseph, S. D. (2007). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 45 (8): 629–634. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237079599_Agronomic_Values_of_Green_Waste_Biochar_as_a_Soil_Amendment
- Chan, K. Y.; Van Zwieten, L.; Meszaros, I.; Downie, A. & Joseph, S. D. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*. 46(5): 437–444. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/240506248_Using_poultry_litter_biochars_as_soil_amendments
- Cruz, H. (2009). Bambú Guadua. *Guadua angustifolia* Kunth: Bosques naturales en Colombia - Plantaciones comerciales en México. Pereira, Colombia : Agromod.
- De Gryze, S.; Cullen, D.M. & Durschinger, L. (2010). Evaluation of the opportunities for generating carbon offsets from soil sequestration of biochar. Terra Global Capital. LLC. Recuperado de http://www.climateactionreserve.org/wpcontent/uploads/2009/03/Soil_Sequestration_Biochar_Issue_Paper1.pdf
- Downie, A.; Crosky, A. & Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar. En: J. Lehmann y S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology* (13-32). Earthscan, United Kingdom : Dunstan house.
- Enders, A; Hanley, K; Whitman, T; Joseph, S; Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114: 644-653. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/223964961_Characterization_of_biochars_to_evaluate_recalcitrance_and_agronomic_performance
- Ennis, C.J.; Evans, A.G.; Islam, M.; Ralebitso-Senior, T.K. & Senior, E. (2012). Biochar: carbon sequestration, land remediation and impacts on soil microbiology. *Critical reviews in environmental science and technology*. 42: 2311-2364. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/221947830_Biochar_Carbon_Sequestration_Land_Remediation_and_Impacts_on_Soil_Microbiology
- Escalante, A.; Pérez, G.; Hidalgo, C.; López, J.; Campo, J.; Valtierra, E. & Etchevers, J. D. (2016). Biocarbón (biochar): naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra*

- Latinoamericana. 34(3):367-382. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>
- Espinoza, A. J. (2010). Aptitud de *Guadua angustifolia* Kunth en la elaboración de tableros aglomerados con cemento. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/537/K50.E7-T.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Falcao, N. (2012). Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio. Do Globo Natureza, com informações do Globo Rural (ed.). Recuperado de <http://gl.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html>
- Ferrini, E. (1967). Fuentes nitrogenadas en el cultivo de maíz híbrido en el valle de Cañete. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Lima, Perú.
- Food and Agriculture Organization. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Foro de expertos de alto nivel (Octubre, 2009). Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- Gathorne-Hardy, A.; Knight, J. & Woods, J. (2009). Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertilizer to improve barley yields in the UK. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 6 (37). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/249231996_Biochar_as_a_soil_amendment_positively_interacts_with_nitrogen_fertiliser_to_improve_barley_yields_in_the_UK
- Gheorghe, C.; Marculescu, C.; Badea, A.; Dinca, C. & Apostol, T. (2009). Effect of pyrolysis conditions on bio-char production from biomass. p. 239-241. In: Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/c47b/51964c1fc9ba5ca1bdb660b5fe31478532f4.pdf>
- Glaser, B.; Basashov, E.; Haumaier, L.; Guggenberger, G. & Zech, W. (2000). Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. Organic Geochemistry 31: 669-678. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/222560163_Black_carbon_in_density_fractions_of_anthropogenic_soils_of_the_Brazilian_Amazon_region
- Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G. & Zech, W. (2001). The *terra preta* phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. The science of

- nature 88(1): 37-41. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/12032464_The_'Terra_Preta'_phenomenon_A_model_for_sustainable_agriculture_in_the_humid_tropics
- Gonzales, H. E. (2002). Estudio de carbonización y sus productos de 01 especies de “paca” (*Guadua angustifolia* y *Gaudua sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, Madre de Dios. Lima, Perú : Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Granatstein, D.; Kruger, C. E.; Collins, H.; Galinato, S.; Garcia-Perez, M. & Yoder, J. (2009). Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment. Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources. Washington State University. Wenatchee, USA. Recuperado de <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/0907062.pdf>
- Guerra, P. A. (2015). Producción y caracterización de biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía peruana. (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1895/Q70.G84-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, G. R. (2015). Caracterización de los productos obtenidos por destilación seca del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth.) procedente del distrito de La Florida, San Miguel, Cajamarca. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2123/K50-G88-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Iglesias, S.F. (2018). Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano. (Tesis Doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3394/iglesias-abad-sergio-fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). Perú: Anuario de estadísticas ambientales 2015. Lima, Perú. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1342/libro.pdf
- International Biochar Initiative. (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. Recuperado de <https://www.biochar->

international.org/wpcontent/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf

- International Energy Agency. (2007). World Energy Outlook 2007: China and India insights. Recuperado de https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2007.pdf
- Ippolito, J. A.; Lentz, R. D.; Novak, M. J. ; Spokas, K. A.; Collins, H. P. & Streubel, J. (2011). Biochar usage: pros and cons. Western Nutrient Management Conference. 9: 93-98. Reno, USA. Recuperado de <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/1522/>
- Khan, S.; Waqas, M.; Ding, F.; Shamsad, I.; Peter, H.; Arp, H.; Li, G. (2015). The influence of various biochars on the bioaccessibility and bioaccumulation of PAHs and potentially toxic elements to turnips (*Brassica rapa* L.). Journal of Hazardous Materials, 300: 243-253. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/279298656_The_influence_of_various_biochars_on_the_bioaccessibility_and_bioaccumulation_of_PAHs_and_potentially_toxic_elements_to_turnips_Brassica_rapa_L
- Kimetu, J.; Lehmann, J.; Ngoze, S.; Mugendi, D.; Kinyangi, J.; Riha, S.; Verchot, L.; Recha, J. W. & Pell, A. N. (2008). Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. Ecosystems 11(5): 726–739. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/200736456_Reversibility_of_Soil_Productivity_Decline_with_Organic_Matter_of_Differing_Quality_Alone_a_Degradation_Gradient
- Laird, D. A.; R. Brown, J; Amonette, J. & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis for coproducing bio-oil and biochar. Biofuels bioproducts and biorefining 3: 547-562. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/227715832_Review_of_the_pyrolysis_platform_for_coproducing_bio-oil_and_biochar
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. Frontiers in ecology and the environment. 5: 381-387. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/221899775_Bio-Energy_in_the_Black
- Lehmann, J. (2009). Terra Preta de Indio. Encyclopedia of Soil Science, 1:1-4. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Please-Scroll-down-for-Article-Encyclopedia-of-Soil-IndioLehmann/934a5b20de6d9c4c12d048e511fdc201f60fed16>

- Lehmann, J. & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, United Kingdom : Dunsten house. Recuperado de <https://biochar-international.org/book/>
- Lehmann, J.; Silva Junior, J. P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W. & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249(2): 343-357. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/226309557_Nutrient_availability_and_leaching_in_an_archaeological_Anthrosol_and_a_Ferralsol_of_the_Central_Amazon_basin_Fertilizer_manure_and_charcoal_amendments
- Lehmann, J.; Gaunt, J. & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11: 403-427. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Liu, L. (2015). Desarrollo de nuevos sustratos a base de compost y biochar para la propagación y producción de *Rosmarinus officinalis* L. en vivero profesional. (Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Valencia). Recuperada de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/54191/LIU%20-%20Desarrollo%20de%20nuevos%20sustratos%20a%20base%20de%20compost%20y%20biochar%20para%20la%20propagaci%C3%B3n%20y%20producci%C3%B3n....pdf?sequence=1>
- Llerena, L. (2008). Hombres y mujeres del distrito de La Florida desarrollando oportunidades de eonegocios a partir del uso sostenible de la caña Guayaquil (*Guadua angustifolia*). (Trabajo Profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina). Lima, Perú.
- Londoño, X. (2010). Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú. Lima, Perú. Recuperado de http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/INFORME%20TAXONOMIA%20BAMB%C3%9A.pdf
- Major, J. (2010). Biochar for soil quality imporvement, climate change mitigations and more. A literature review. Recuperado de <http://www.gara.de/fileadmin/gara/Untersuchungen/BiocharSoilFertility.pdf>
- Martínez, H. (2005). La cadena de la guadua en Colombia: Una mirada global de la estructura y dinámica. Bogotá, Colombia : Observatorio Agrocadenas Colombia.

- 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. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/248167730_Preparation_and_Characteristics_of_Carbon_from_Olive_Stones_and_Walnut_Shells
- Masêk, O. & Brownsort, P. (2011). Biochar Production. En: Shackley: S.; Sohi, S. (Eds.), *An Assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil* (37-44). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/230583068_An_Assessment_of_the_Benefits_and_Issues_Associated_with_the_Application_of_Biochar_to_Soil
- McCellan, T.; Deenik, J.; Uehara, G. & Antal, M. (2007). Effect of flashed carbonized macadamia nutshell charcoal on plant and soil chemical properties. Recuperado de http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/Tai_Charcoal_CTAHR_Sym_2007.pdf
- McElligott, K.; Page-Dumroese, D. & Coleman, M. (2011). Bioenergy Production Systems and Biochar Application in Forests: Potential for Renewable Energy, Soil Enhancement, and Carbon Sequestration. *Rocky Mountain Research Station-Research Note*, 46: 1-14. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/287306516_Bioenergy_production_systems_and_biochar_application_in_forests_Potential_for_renewable_energy_soil_enhancement_and_carbon_sequestration
- McLaughlin, H.; Anderson, P.; Shields, F. & Reed, T. B. (2009). All biochars are not created equal and how to tell them apart. North American Biochar Conference. Boulder, CO, USA. Recuperado de https://cdn.shopify.com/s/files/1/0246/9533/files/All_Biochars_are_Not_Created_Equal_and_How_to_Tell_Them_Apart.pdf
- Ministerio de Agricultura. (2008). Plan Nacional de Promoción del Bambú 2008 – 2020. (2° ed.). Lima, Perú : MINAG. Recuperado de <http://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Plan%20Nacional%20del%20Bambu.pdf>
- Moreno, J.; Moral, R.; García, J. L.; Pascual, J. A. & Bernal, M. P. (2007). *Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas*. Madrid, España: Mundi Prensa.

- Okimori, Y.; Ogawa, M. & Takahashi, F. (2003). Potential of CO₂ emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra, Indonesia. *Mitigation and adaptation strategies global change*. 8: 261–280. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/227593616_Potential_of_CO2_emission_reductions_by_carbonizing_biomass_waste_from_industrial_tree_plantation_in_South_Sumatra_Indonesia
- Otavio, J.; Tomazello, M. & Luiz de Barros, A. (1987). Producción y caracterización del carbón vegetal de especies y variedades de Bambú (p. 13-17). Piracicaba, Brasil: IPEF.
- Paco, D. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. (Proyecto fin de carrera, Universitat Autònoma de Barcelona). Recuperada de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf
- Petersen, J.B; Neves, E. & Heckenberger, M.J. (2001). Gift from the past: Terra preta, a prehistoric Amerindian occupation in Amazonia. En C. McEwan, C. Barreto and E. Neves (Eds.) *Unknow Amazonia* (p. 86-105). London, United Kingdom : British Museum Press.
- Roberts, K. G; Gloy, B. A.; Joseph, S.; Scott, N. R. & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential. *Environmental science and technology*. 44: 827-833. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/40765883_Life_Cycle_Assessment_of_Biochar_Systems_Estimating_the_Energetic_Economic_and_Climate_Change_Potential
- Rondon, M. A.; Lehmann, J.; Ramírez, J. & Hurtado, M. (2007). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility Soils* 43 (6): 699-708. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0152-z>
- Salcedo, S. E. (2016). Comparativo de fuentes nitrogenadas en un suelo arenoso utilizando como cultivo indicador al maíz (*Zea mays* L.), a nivel de invernadero. (Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2628/F04-S3423-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Schmidt, M.W. & Noack, A.G. (2000). Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochem. Cycles* 14: 777-793. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/280799321_Black_carbon_in_soils_and_sediments_Analysis_distribution_implications_and_current_challenges

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (7 de junio de 2019). Dirección de Redes de Observación y Datos. Estación: Von Humboldt [consulta en página web]. Recuperado de https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278

Sohi, S.; Lopez-Capel, E.; Krull, E. & Bol, R. (2009). Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report. p 64. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/221899774_Biochar's_Roles_in_Soil_and_Climate_Change_A_Review_of_Research_Needs

Sullivan, D.M. & Miller, R.O. (2001). Compost quality attributes measurements and variability. En: P.J. Stofella, y B.A. Kahn (eds.), Compost utilization in horticultural cropping systems (p. 95-120). Boca Ratón, USA : CRC Press. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000140&pid=S0122-3461201300020000500025&lng=en

Takahashi, J. & Ascencios, D. (2004). Inventario de Bambú en el Perú. Lima, Perú: AB Sustenta [diapositivas]. Recuperado de <https://studylib.es/doc/7579092/inventario-de-bamb%C3%BA-en-el-per%C3%BA>

Universidad de Sassari - Fundación AVSI. (2017). Manual Técnico del Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) para productores. Amazonas, Perú. Recuperado de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/09/Manual%20Tecnico%20del%20Bambu%20para%20Productores.pdf>

Universidad Miguel Hernández. (2016?). Restauración de suelos degradados. [separatas del curso] Orihuela, España : Universidad Miguel Hernández.


Verheijen, F.; Jeffery, S.; Bastos, A. C.; Van der Velde, M. & Diafas, F. (2010). Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties. Processes and Functions. Office for the Official Publications of the European Communities. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/309042036_Biochar_application_to_soils_A_critical_scientific_review_of_effects_on_soil_properties_processes_and_functions

s


- Woods, W.I. (2004). Development of anthrosol research. In: J. Lehmann, D. C. Kern, B. Glaser, & W. I. Woods (eds.), *Amazonian Dark Earths* (p. 1-14). Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/226748141_Development_of_Anthrosol_Research
- Woods, W. I.; Glaser, B. (2004). *Amazonian dark earths: Explorations in space and time*. Heildeberg, Germany : Springer-Verlag. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321609974_Amazonian_Dark_Earths_Explorations_in_Space_and_Time
- Zheng, H.; Wang, Z.; Deng, X.; Herbert, S. & Xing, B. (2013). Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma* 206: 32-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.018>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Análisis de caracterización de la tierra de chacra que se empleó como sustrato para el ensayo experimental



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante : GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS Bolt.: 2720

Provincia : LIMA

Departamento : LIMA

Distrito : LA MOLINA

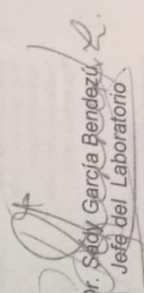
Referencia : H.R. 67455-030C-19

Fecha : 13/03/19


Lab	Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g					Suma de Cationes Bases	% de Silt. De Bases	
	Claves								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
1785			7.69	2.37	2.20	0.61	5.9	153	38	36	26	Fr.	16.32	11.34	2.98	0.72	1.27	0.00	16.32	16.32	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso.
Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra	
Lab	C.C
1785	22.95




Dr. Sady Garcia Bendezu
Jefe del Laboratorio




Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: lab suelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 2: Análisis de caracterización del sustrato de cada uno de los tratamientos del ensayo experimental.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante : GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS

Departamento : LIMA

Distrito : LA MOLINA

Referencia : H.R. 67547-037C-19

Provincia : LIMA

Predio :

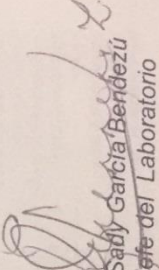
Fecha : 22/03/19

Bott.: 2751


Lab	Número de Muestra Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g			Suma de Cationes Bases	% Sat. De Bases		
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺			Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺
2384	B 20	7.56	1.91	2.30	0.88	9.0	135	52	26	22	Fr.Ar.A.	14.40	10.57	2.32	0.61	0.90	0.00	14.40	100
2385	B 40	7.81	1.44	2.40	0.77	20.8	154	50	28	22	Fr.	13.12	8.88	2.58	0.65	1.01	0.00	13.12	100
2386	B 80	7.73	1.62	2.30	0.77	9.6	163	52	26	22	Fr.Ar.A.	12.32	7.75	2.73	0.68	1.16	0.00	12.32	100
2387	B 160	7.80	2.18	2.40	0.81	10.9	216	52	26	22	Fr.Ar.A.	12.32	7.65	2.75	0.82	1.10	0.00	12.32	100
2388	Fert.	7.77	1.34	2.30	0.76	10.7	124	50	28	22	Fr.	13.60	9.65	2.52	0.50	0.93	0.00	13.60	100
2389	Test.	7.82	1.58	2.40	0.77	7.9	124	52	26	22	Fr.Ar.A.	13.44	9.39	2.53	0.51	1.01	0.00	13.44	100

Lab	Número de Muestra Claves	C.C %
2384	B 20	20.09
2385	B 40	20.21
2386	B 80	19.90
2387	B 160	20.46
2388	Fert.	19.45
2389	Test.	19.80

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; F.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso




Dr. Sady García Bendezu
Jefe del Laboratorio




Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 3: Análisis especial en foliar para las hojas de *Zea mays* L. para determinar la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS

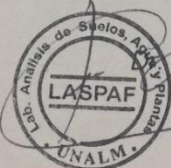
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA

MUESTRA : HOJAS DE MAIZ

REFERENCIA : H.R. 67545

FECHA : 25/03/2019

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	N %	P %	K %
1204	B 20 - 1	1.23	0.08	6.12
1205	B 20 - 2	1.04	0.07	4.64
1206	B 20 - 3	1.20	0.07	4.86
1207	B 20 - 4	1.04	0.10	4.31
1208	B 20 - 5	1.01	0.09	6.10
1209	B 40 - 1	1.09	0.09	5.89
1210	B 40 - 2	1.29	0.08	5.16
1211	B 40 - 3	1.12	0.07	5.60
1212	B 40 - 4	1.04	0.08	6.05
1213	B 40 - 5	0.98	0.07	6.70
1214	B 80 - 1	0.92	0.07	3.30
1215	B 80 - 2	0.98	0.07	3.26
1216	B 80 - 3	0.87	0.08	3.35
1217	B 80 - 4	0.84	0.07	3.27
1218	B 80 - 5	0.92	0.07	4.72



Sady García Bendezu
 Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

...Continuación.




UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : GILBER PAOLO ZAMORA BRINGAS
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
MUESTRA : HOJAS DE MAIZ
REFERENCIA : H.R. 67545
FECHA : 25/03/2019

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	N %	P %	K %
1219	B 160 - 1	0.90	0.10	3.81
1220	B 160 - 2	1.04	0.07	3.32
1221	B 160 - 3	0.78	0.06	3.55
1222	B 160 - 4	0.90	0.07	3.96
1223	B 160 - 5	0.98	0.08	4.38
1224	FERT -1	1.99	0.08	3.29
1225	FERT -2	1.57	0.08	4.09
1226	FERT -3	1.79	0.10	2.87
1227	FERT -4	1.85	0.09	4.01
1228	FERT -5	1.82	0.11	3.41
1229	TEST -1	1.20	0.08	3.78
1230	TEST -2	1.62	0.14	4.77
1231	TEST -3	1.23	0.06	4.39
1232	TEST -4	1.06	0.07	3.85
1233	TEST -5	1.06	0.07	4.50


Sady García Bendezú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 4: Análisis estadístico para la concentración de nitrógeno en las hojas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

Muestra Nitrogen
B160 :5 Min. :0.780
B20 :5 1st Qu.:0.980
B40 :5 Median :1.050
B80 :5 Mean :1.179
FERT :5 3rd Qu.:1.230
TESTIGO:5 Max. :1.990

ANOVA Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Muestra 5 2.7325 0.5465 29.2 1.84e-09 ***
Residuals 24 0.4492 0.0187

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residuales

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.126	-0.064	0.096	-0.064	-0.094	-0.014	0.186	0.016	-0.064	-0.124	0.014
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0.074	-0.036	-0.066	0.014	-0.020	0.120	-0.140	-0.020	0.060	0.186	-0.234
23	24	25	26	27	28	29	30			
-0.014	0.046	0.016	-0.034	0.386	-0.004	-0.174	-0.174			

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuals

W = 0.94962, p-value = 0.1651

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales by Muestra

Bartlett's K-squared = 7.9895, df = 5, p-value = 0.1568

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

\$statistics

MSError	Df	Mean	CV	MSD
0.01871667	24	1.178667	11.60709	0.267531

\$parameters

test	name.t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	Muestra	6	4.372651	0.05

...Continuación.

\$means

	Nitrogen	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
B160	0.920	0.097	97959	5	0.78	1.04	0.90	0.90	0.98
B20	1.104	0.102	61579	5	1.01	1.23	1.04	1.04	1.20
B40	1.104	0.116	74759	5	0.98	1.29	1.04	1.09	1.12
B80	0.906	0.053	66563	5	0.84	0.98	0.87	0.92	0.92
FERT	1.804	0.151	59156	5	1.57	1.99	1.79	1.82	1.85
TESTIGO	1.234	0.229	52124	5	1.06	1.62	1.06	1.20	1.23

\$comparison

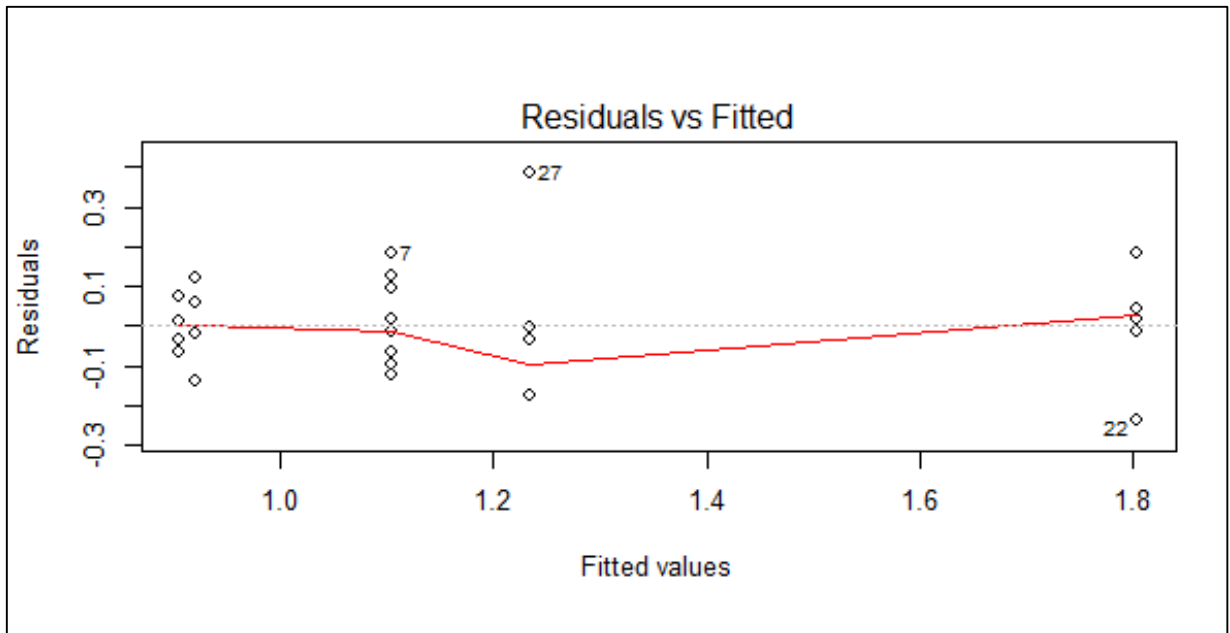
NULL

\$groups

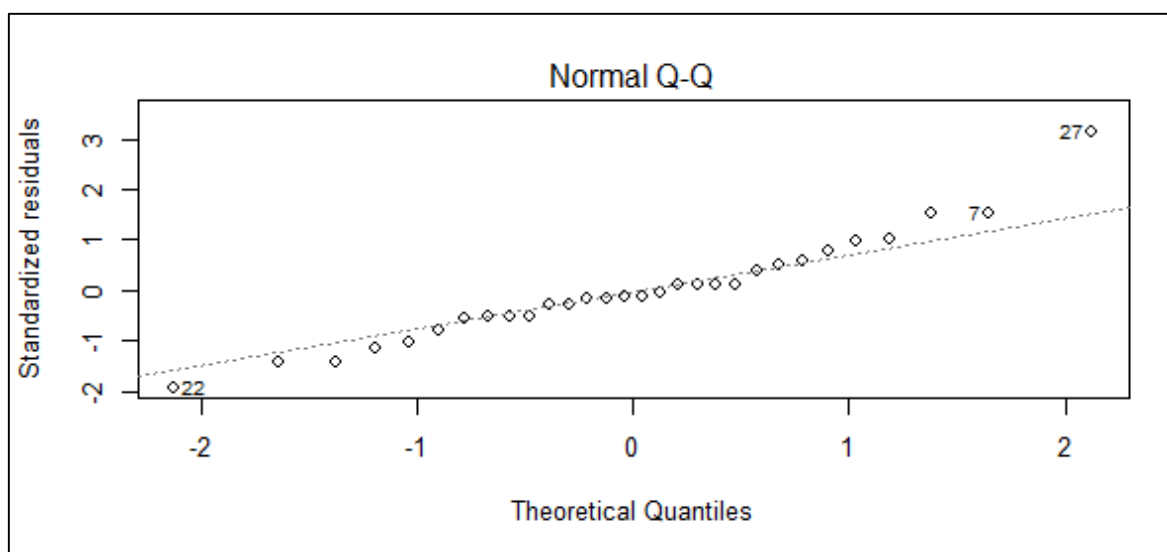
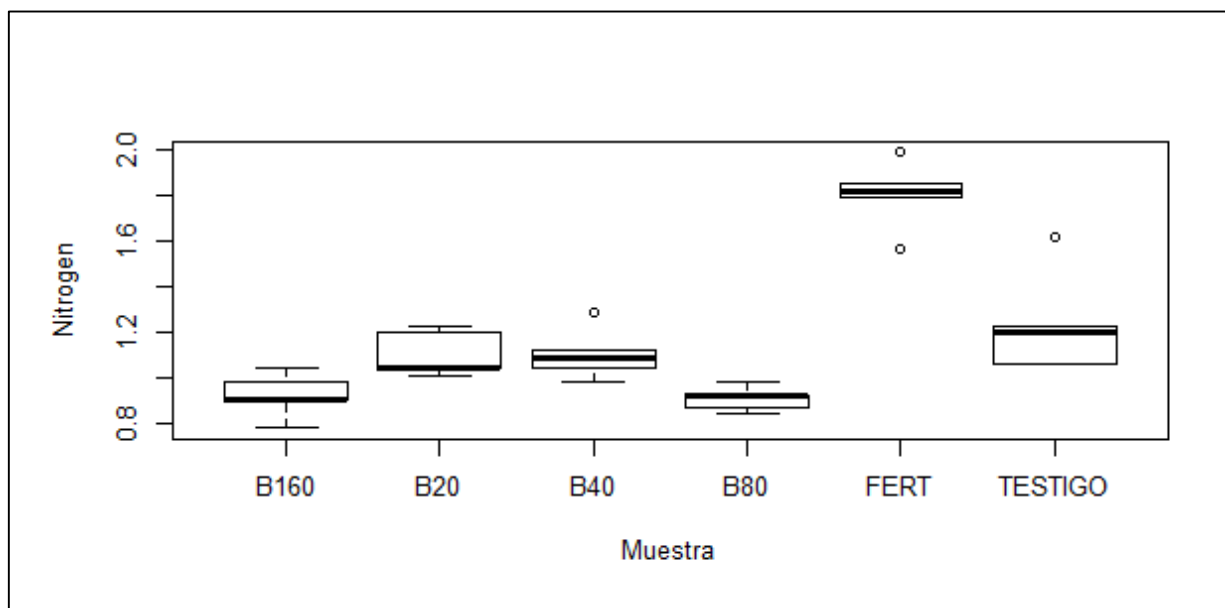
	Nitrogen	groups
FERT	1.804	a
TESTIGO	1.234	b
B20	1.104	bc
B40	1.104	bc
B160	0.920	c
B80	0.906	c

attr("class")

[1] "group"



...Continuación.



ANEXO 5: Análisis estadístico para la concentración de fósforo en las hojas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

```
Muestra Phosphorus
B160 :5 Min. :0.06000
B20 :5 1st Qu.:0.07000
B40 :5 Median :0.07500
B80 :5 Mean :0.07833
FERT :5 3rd Qu.:0.08000
TESTIGO:5 Max. :0.11000
```

```
ANOVA      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Muestra    5 0.001577 0.0003153  2.665 0.0472 *
Residuals 24 0.002840 0.0001183
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residuales1

```
 1      2      3      4      5
-2.000000e-03 -1.200000e-02 -1.200000e-02  1.800000e-02  8.000000e-03
 6      7      8      9     10
 1.200000e-02  2.000000e-03 -8.000000e-03  2.000000e-03 -8.000000e-03
11     12     13     14     15
-2.000000e-03 -2.000000e-03  8.000000e-03 -2.000000e-03 -2.000000e-03
16     17     18     19     20
 2.400000e-02 -6.000000e-03 -1.600000e-02 -6.000000e-03  4.000000e-03
21     22     23     24     25
-1.200000e-02 -1.200000e-02  8.000000e-03 -2.000000e-03  1.800000e-02
26     27     28     29     30
 1.000000e-02  3.252607e-18 -1.000000e-02  3.252607e-18  3.252607e-18
```

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuales1

W = 0.95223, p-value = 0.1939

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales1 by Muestra

Bartlett's K-squared = 6.4713, df = 5, p-value = 0.263

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

\$statistics

```
MSerror Df Mean CV MSD
0.0001183333 24 0.07833333 13.88695 0.02127225
```

...Continuación.

\$parameters

```
test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey Muestra 6 4.372651 0.05
```

\$means

	Phosphorus	std r	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
B160	0.076	0.015165751	5	0.06	0.10	0.07	0.07	0.08
B20	0.082	0.013038405	5	0.07	0.10	0.07	0.08	0.09
B40	0.078	0.008366600	5	0.07	0.09	0.07	0.08	0.08
B80	0.072	0.004472136	5	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07
FERT	0.092	0.013038405	5	0.08	0.11	0.08	0.09	0.10
TESTIGO	0.070	0.007071068	5	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07

\$comparison

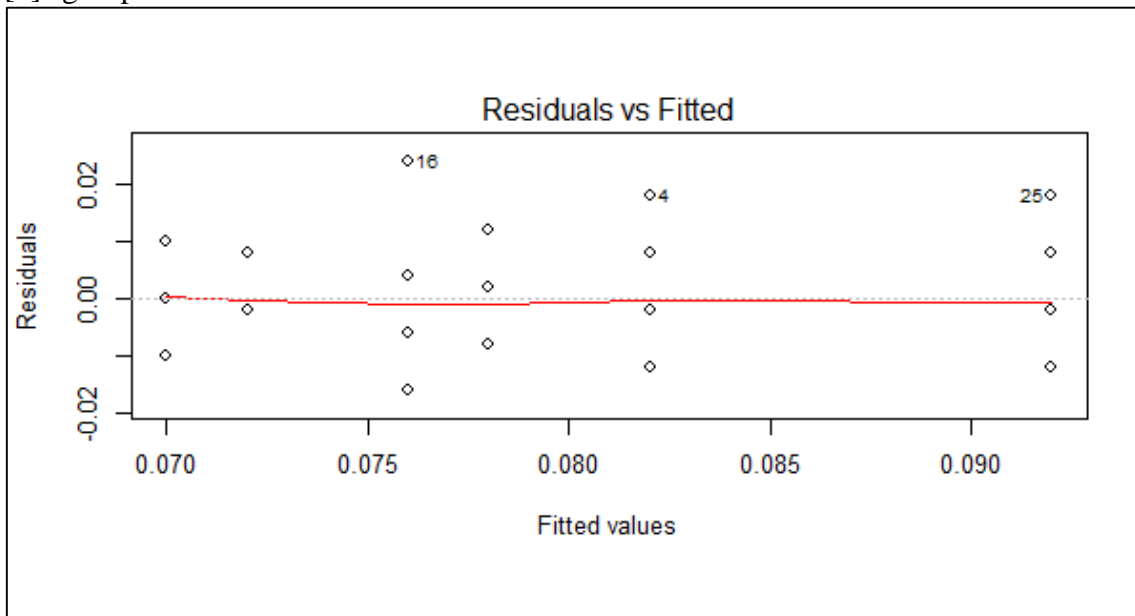
NULL

\$groups

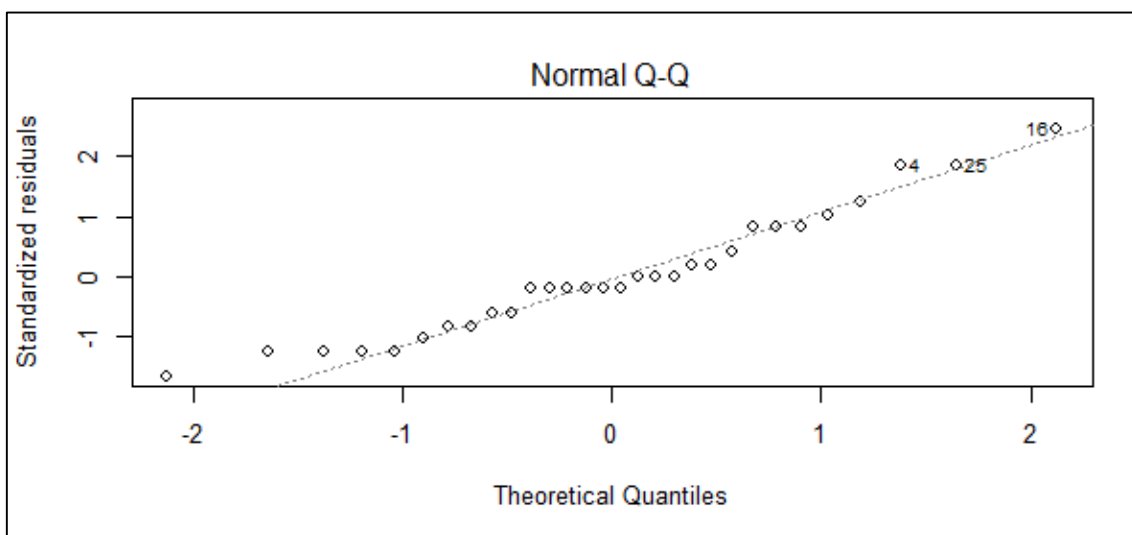
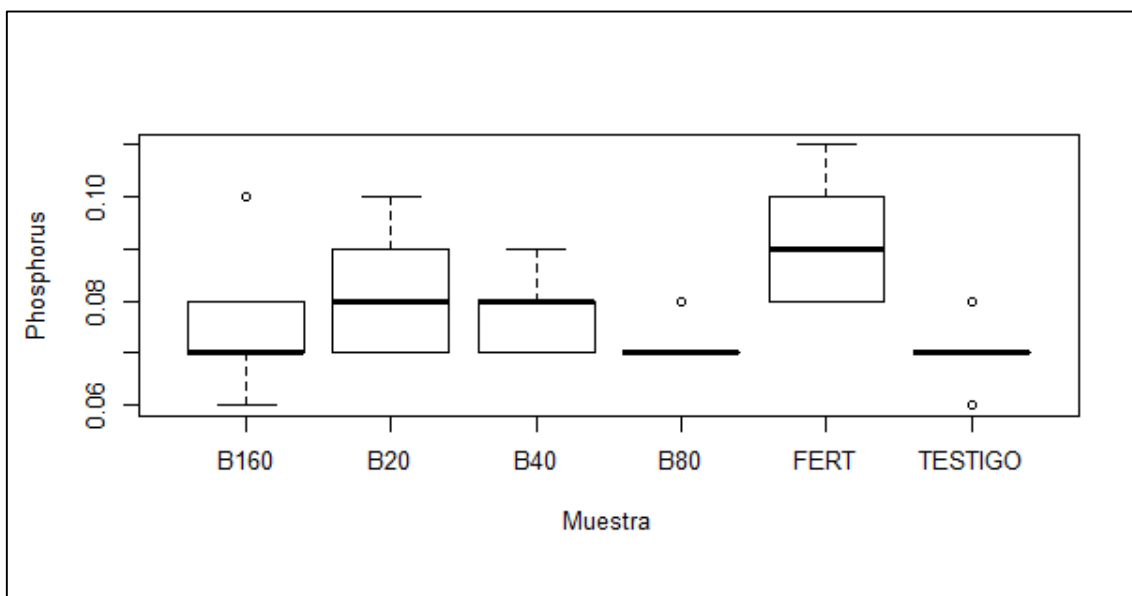
	Phosphorus	groups
FERT	0.092	a
B20	0.082	ab
B40	0.078	ab
B160	0.076	ab
B80	0.072	ab
TESTIGO	0.070	b

attr("class")

[1] "group"



...Continuación.



ANEXO 6: Análisis estadístico para la concentración de potasio en las hojas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

```
> summary(Potasio)
  Muestra Potassium
B160 :5 Min. :2.870
B20  :5 1st Qu.:3.445
B40  :5 Median :4.200
B80  :5 Mean  :4.377
FERT :5 3rd Qu.:4.838
TESTIGO:5 Max. :6.700
ANOVA   Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Muestra  5 23.173  4.635  13.49 2.55e-06 ***
Residuals 24  8.245  0.344
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Residuales2

```
  1  2  3  4  5  6  7  8  9 10
0.914 -0.566 -0.346 -0.896 0.894 0.010 -0.720 -0.280 0.170 0.820
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
-0.280 -0.320 -0.230 -0.310 1.140 0.006 -0.484 -0.254 0.156 0.576
 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
-0.244 0.556 -0.664 0.476 -0.124 -0.478 0.512 0.132 -0.408 0.242
```

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuales2
W = 0.9523, p-value = 0.1947

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales2 by Muestra
Bartlett's K-squared = 2.8589, df = 5, p-value = 0.7217

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

```
$statistics
MSerror Df Mean CV MSD
0.3435267 24 4.377 13.39071 1.146146
```

```
$parameters
test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey Muestra 6 4.372651 0.05
```

...Continuación.

\$means

	Potassium	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
B160	3.804	0.404	6356	5	3.32	4.38	3.55	3.81	3.96
B20	5.206	0.848	1627	5	4.31	6.12	4.64	4.86	6.10
B40	5.880	0.569	6929	5	5.16	6.70	5.60	5.89	6.05
B80	3.580	0.638	2398	5	3.26	4.72	3.27	3.30	3.35
FERT	3.534	0.512	7182	5	2.87	4.09	3.29	3.41	4.01
TESTIGO	4.258	0.428	1005	5	3.78	4.77	3.85	4.39	4.50

\$comparison

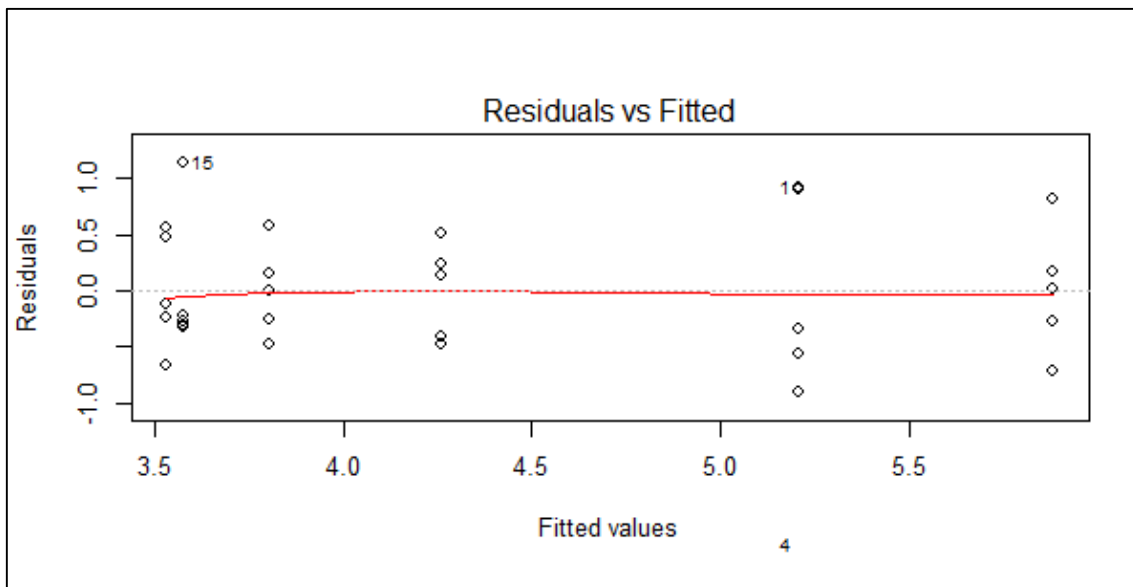
NULL

\$groups

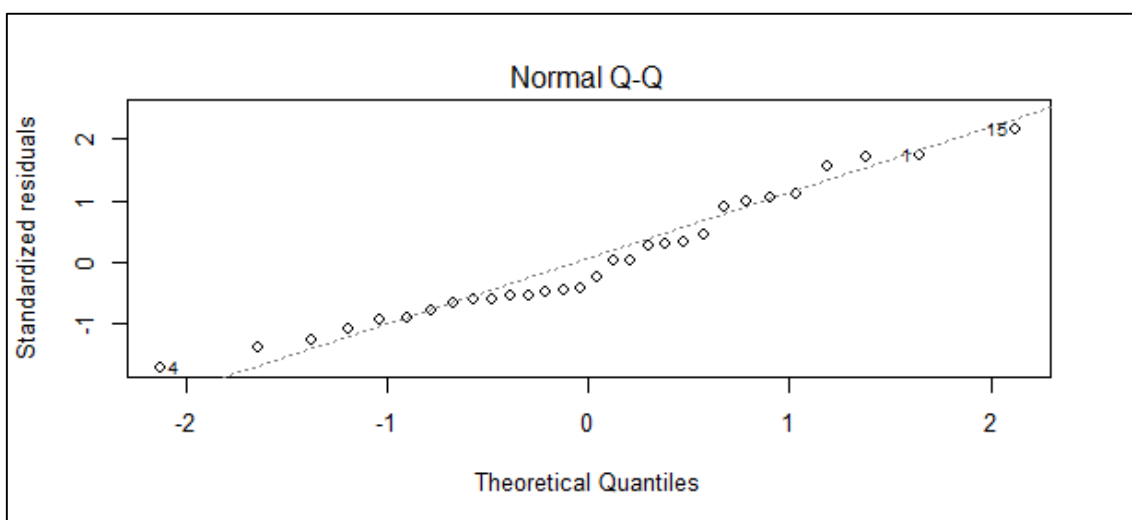
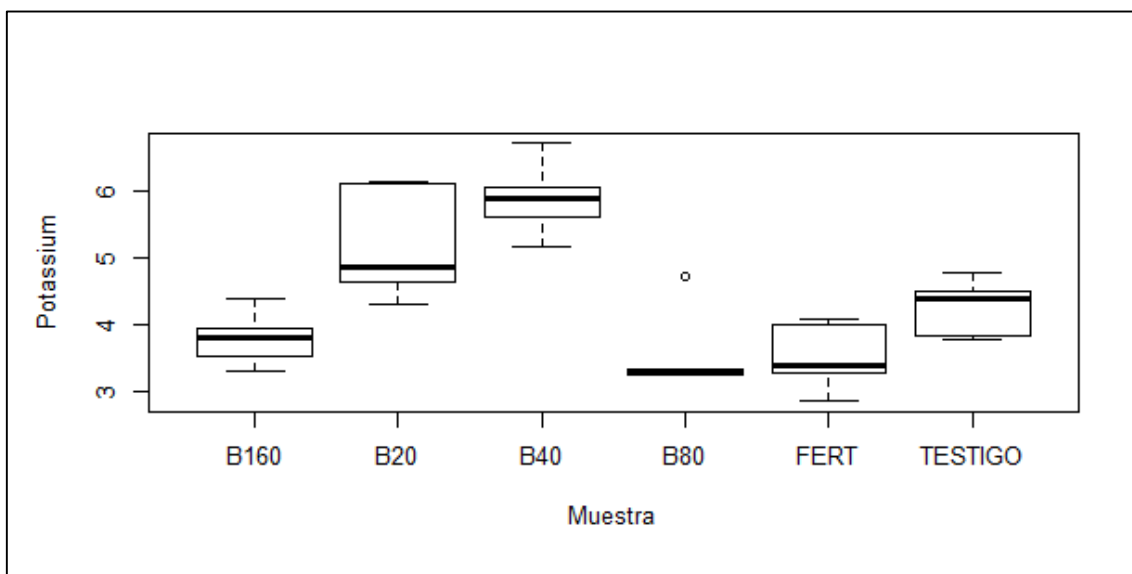
	Potassium	groups
B40	5.880	a
B20	5.206	ab
TESTIGO	4.258	bc
B160	3.804	c
B80	3.580	c
FERT	3.534	c

attr("class")

[1] "group"



...Continuación.



ANEXO 7: Análisis estadístico para la biomasa aérea de las plantas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

```
> summary(MS.Aerea)
  Muestra   MSA
B160 :5 Min. :12.41
B20  :5 1st Qu.:13.84
B40  :5 Median :14.24
B80  :5 Mean  :14.30
FERT :5 3rd Qu.:14.77
TESTIGO:5 Max. :15.91
ANOVA   Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Muestra  5  9.753  1.9505  4.728 0.0038 **
Residuals 24  9.901  0.4125
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residuales3
  1  2  3  4  5  6  7  8  9 10
0.188 0.068 -0.392 0.648 -0.512 0.422 -0.178 -0.178 0.222 -0.288
 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
-0.508 0.912 -0.588 0.192 -0.008 0.496 1.216 -0.524 -0.814 -0.374
 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
0.340 0.420 -0.260 0.300 -0.800 1.342 -0.588 0.362 -0.118 -0.998
```

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

```
data: residuales3
W = 0.96892, p-value = 0.5102
```

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

```
data: residuales3 by Muestra
Bartlett's K-squared = 5.2099, df = 5, p-value = 0.3908
```

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

```
$statistics
MSerror Df Mean CV MSD
0.412535 24 14.3 4.491531 1.256002
```

```
$parameters
test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey Muestra 6 4.372651 0.05
```


...Continuación.

\$means

	MSA	std r	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
B160	14.972	0.4678889	5	14.46	15.62	14.58	15.04	15.16
B20	14.118	0.3056469	5	13.83	14.54	13.94	13.94	14.34
B40	14.628	0.6067289	5	14.04	15.54	14.12	14.62	14.82
B80	14.694	0.8369170	5	13.88	15.91	14.17	14.32	15.19
FERT	13.210	0.5219195	5	12.41	13.63	12.95	13.51	13.55
TESTIGO	14.178	0.9065980	5	13.18	15.52	13.59	14.06	14.54

\$comparison

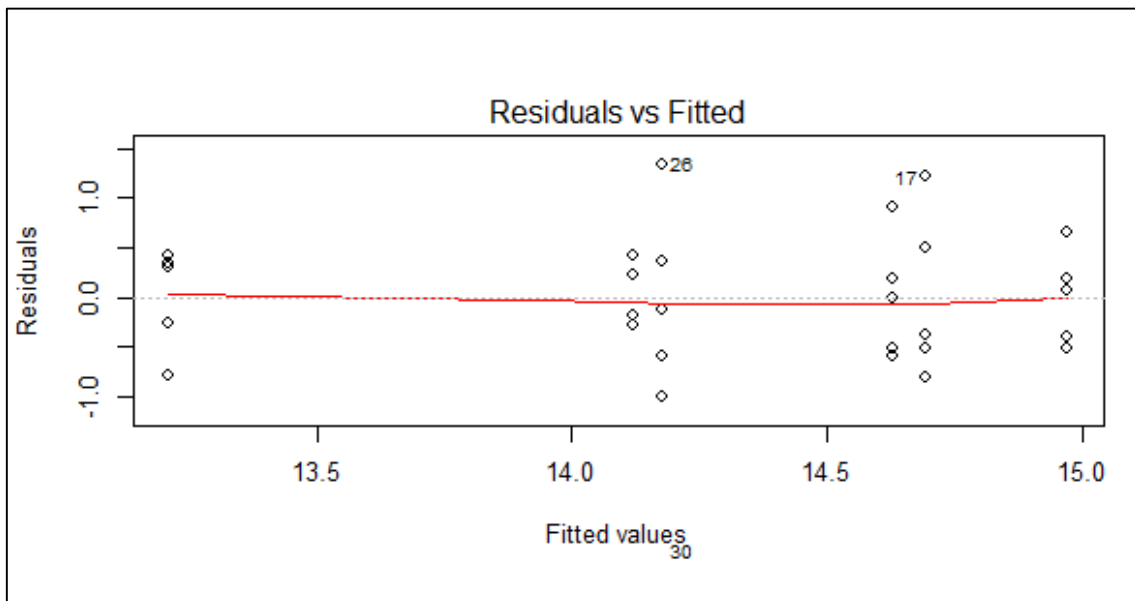
NULL

\$groups

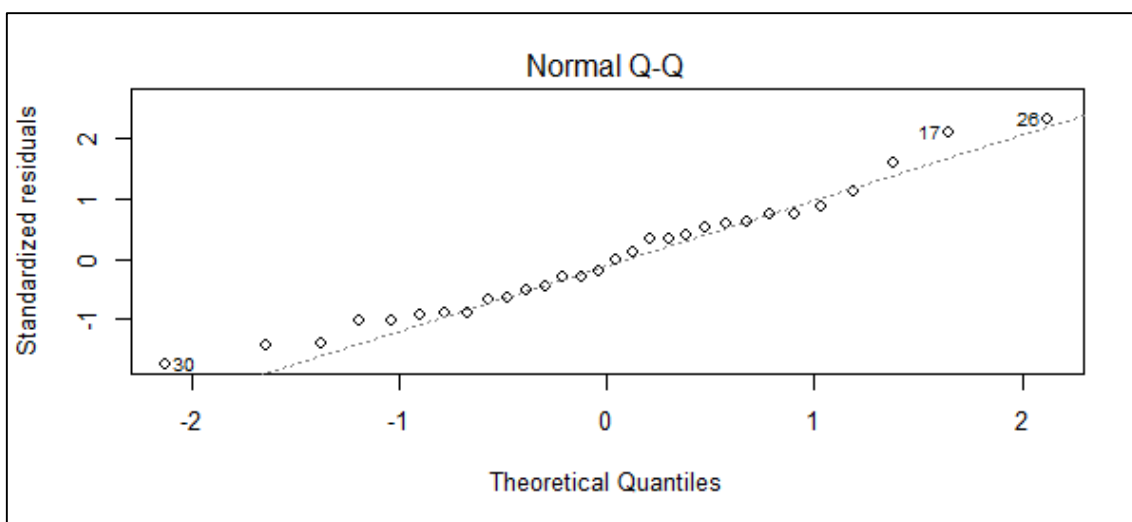
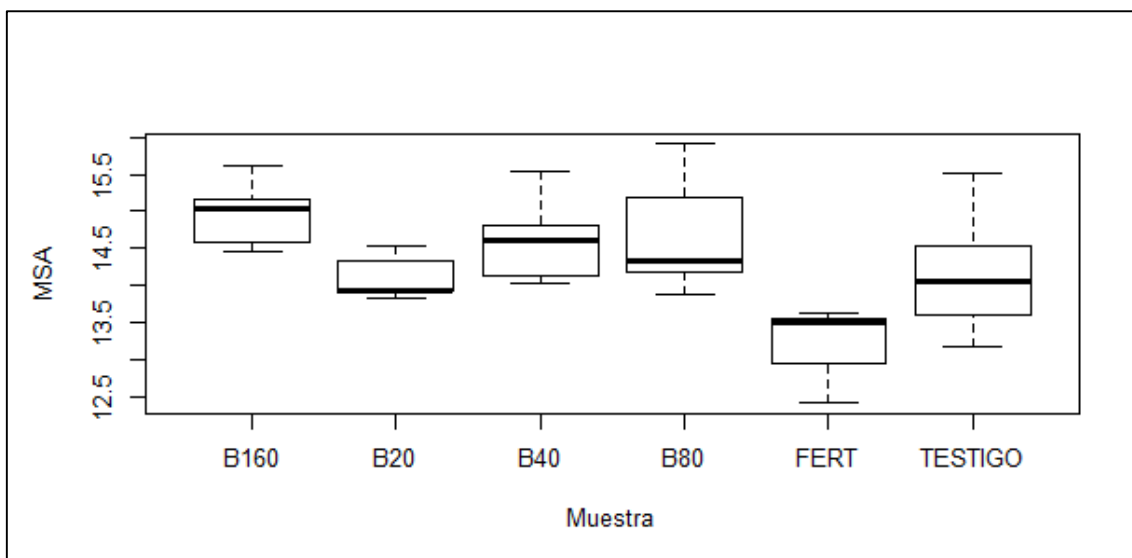
	MSA	groups
B160	14.972	a
B80	14.694	a
B40	14.628	a
TESTIGO	14.178	ab
B20	14.118	ab
FERT	13.210	b

attr("class")

[1] "group"



...Continuación.



ANEXO 8: Análisis estadístico para la altura de las plantas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuales

W = 0.98904, p-value = 0.2905

> bartlett.test(residuales~MACETA, Altura)

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales by MACETA

Bartlett's K-squared = 2.1931, df = 5, p-value = 0.8218

> library(lsmmeans)

> lsmmeans(Modelo,~MACETA)

	MACETA	lsmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
B160	54.1	0.970	143	52.1	56.0	
B20	49.8	0.958	143	47.9	51.7	
B40	49.6	0.959	143	47.7	51.5	
B80	54.3	0.979	143	52.4	56.3	
FERT	62.4	0.958	143	60.5	64.3	
TEST	48.3	0.975	143	46.4	50.3	

Confidence level used: 0.95

> medias.lsm <- lsmmeans(Modelo, pairwise ~ MACETA, glhargs=list());medias.lsm

\$lsmmeans

	MACETA	lsmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
B160	54.1	0.970	143	52.1	56.0	
B20	49.8	0.958	143	47.9	51.7	
B40	49.6	0.959	143	47.7	51.5	
B80	54.3	0.979	143	52.4	56.3	
FERT	62.4	0.958	143	60.5	64.3	
TEST	48.3	0.975	143	46.4	50.3	

Confidence level used: 0.95

\$contrasts

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
B160 - B20	4.267	1.37	143	3.114	0.0266
B160 - B40	4.451	1.37	143	3.242	0.0182
B160 - B80	-0.277	1.35	143	-0.205	0.9999
B160 - FERT	-8.345	1.37	143	-6.095	<.0001
B160 - TEST	5.737	1.40	143	4.103	0.0009

...Continuación.

B20 - B40	0.184	1.35	143	0.136	1.0000
B20 - B80	-4.544	1.38	143	-3.298	0.0153
B20 - FERT	-12.612	1.35	143	-9.323	<.0001
B20 - TEST	1.470	1.36	143	1.081	0.8882
B40 - B80	-4.728	1.38	143	-3.423	0.0103
B40 - FERT	-12.796	1.35	143	-9.457	<.0001
B40 - TEST	1.286	1.36	143	0.947	0.9335
B80 - FERT	-8.068	1.38	143	-5.861	<.0001
B80 - TEST	6.014	1.41	143	4.266	0.0005
FERT - TEST	14.082	1.36	143	10.352	<.0001

P value adjustment: tukey method for comparing a family of 6 estimates

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

\$statistics

MSError	Df	Mean	CV	MSD
22.87653	143	53.09	9.00912	3.907952

\$parameters

test name	t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	MACETA	6	4.085302	0.05

\$means

Yi	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75	
B160	54.22	5.524717	25	43.5	65.0	50.5	54.0	59.5
B20	49.74	4.767774	25	42.0	59.5	46.0	49.5	52.5
B40	49.54	4.471950	25	42.0	58.0	46.5	50.0	52.0
B80	54.54	4.953786	25	45.0	64.0	53.0	54.0	57.5
FERT	62.36	4.829424	25	54.0	72.0	58.5	61.0	66.0
TEST	48.14	4.011754	25	41.0	56.0	46.5	47.5	49.5

\$comparison

NULL

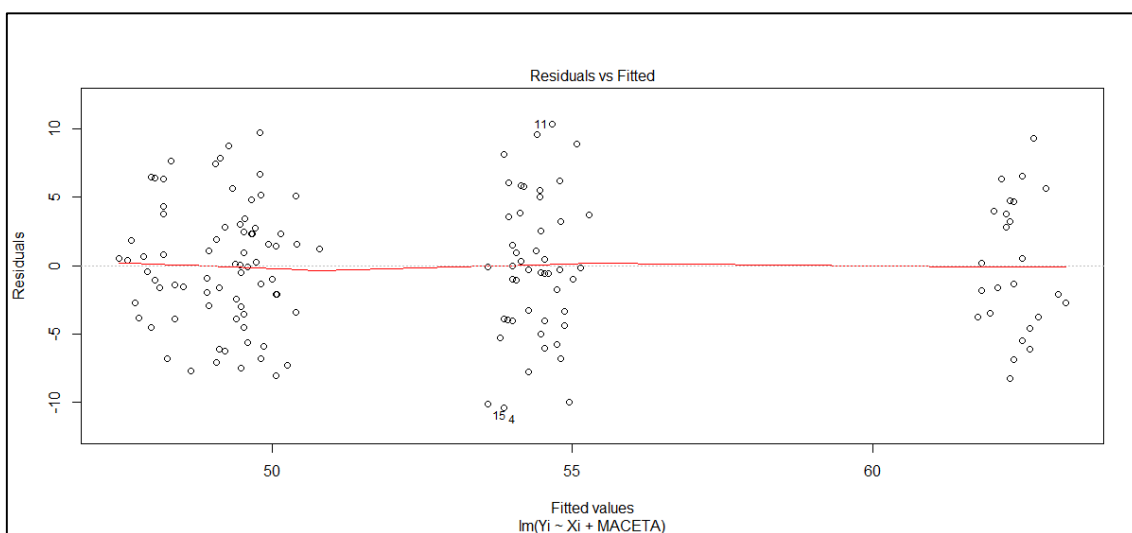
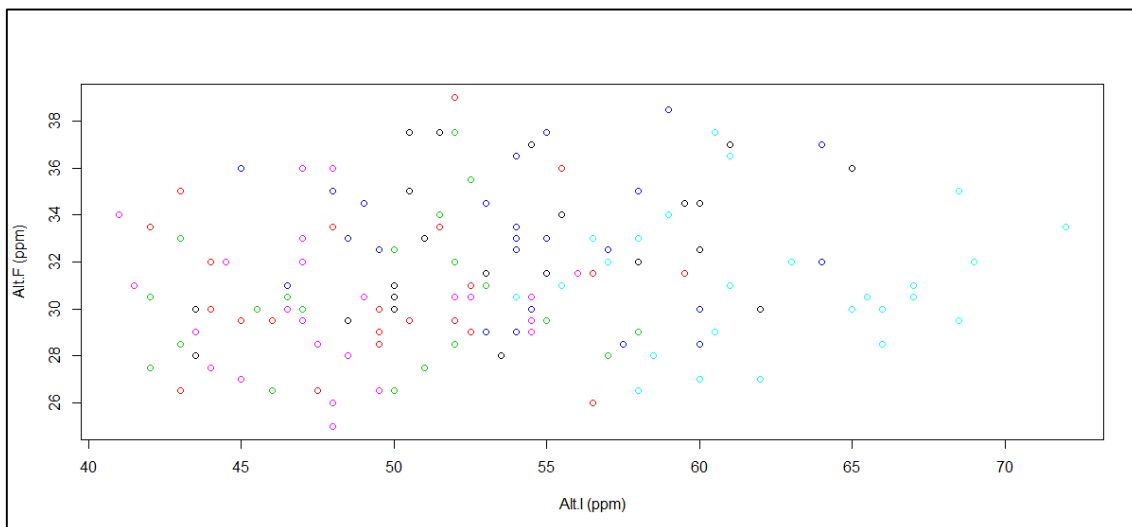
\$groups

Yi	groups
FERT 62.36	a
B80 54.54	b
B160 54.22	b
B20 49.74	c
B40 49.54	c
TEST 48.14	c

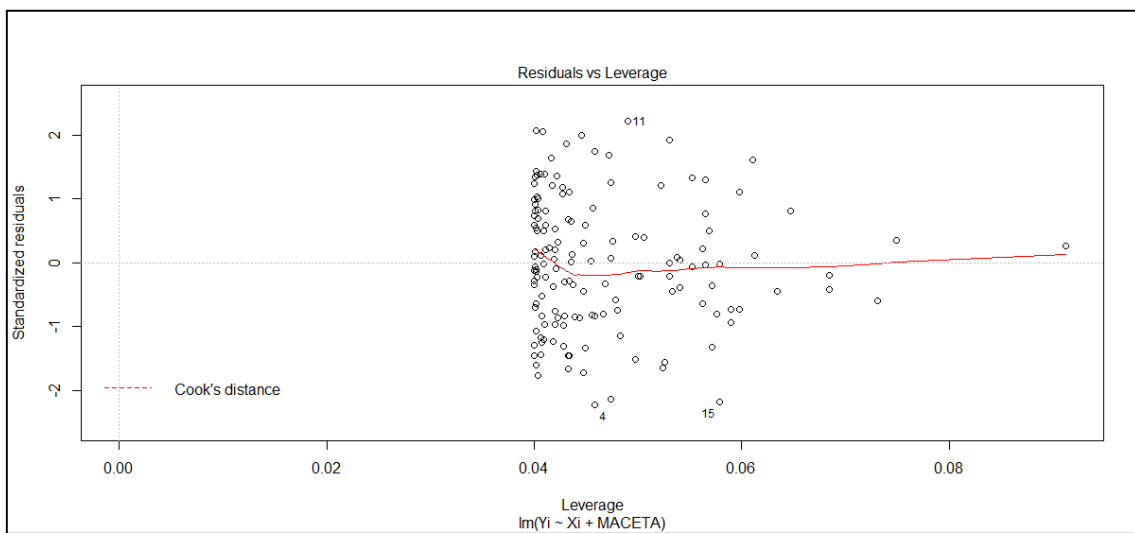
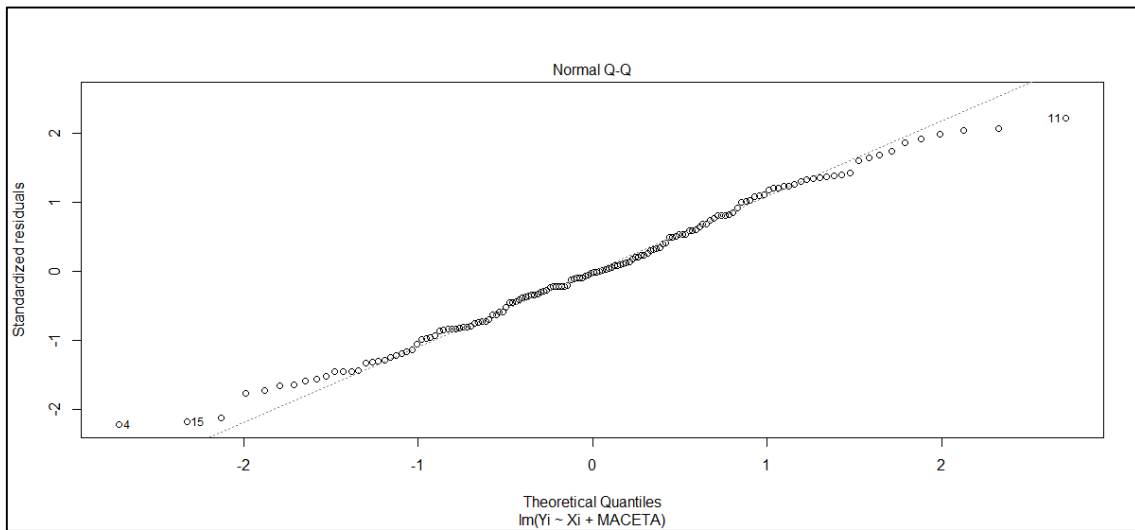
attr("class")

[1] "group"

...Continuación.



...Continuación.



ANEXO 9: Análisis estadístico para el grosor de tallo de las plantas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

```
data: residuales
W = 0.98872, p-value = 0.2691
> bartlett.test(residuales~MACETA, Grosor)
```

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

```
data: residuales by MACETA
Bartlett's K-squared = 6.9261, df = 5, p-value = 0.2262
```

```
> #Comparacion de medias (ajuste de medias)
> library(lsmmeans)
> lsmmeans(Modelo,~MACETA)
MACETA lsmmean  SE df lower.CL upper.CL
B160    6.90 0.0902 143  6.72  7.08
B20     5.74 0.0887 143  5.56  5.91
B40     5.91 0.0879 143  5.74  6.08
B80     6.79 0.0878 143  6.62  6.97
FERT    7.71 0.0883 143  7.54  7.89
TEST    5.75 0.0906 143  5.58  5.93
```

Confidence level used: 0.95

```
> medias.lsm <- lsmmeans(Modelo, pairwise ~ MACETA, glhargs=list());medias.lsm
$lsmeans
```

```
MACETA lsmmean  SE df lower.CL upper.CL
B160    6.90 0.0902 143  6.72  7.08
B20     5.74 0.0887 143  5.56  5.91
B40     5.91 0.0879 143  5.74  6.08
B80     6.79 0.0878 143  6.62  6.97
FERT    7.71 0.0883 143  7.54  7.89
TEST    5.75 0.0906 143  5.58  5.93
```

Confidence level used: 0.95

```
$contrasts
```

```
contrast estimate  SE df t.ratio p.value
B160 - B20  1.1669 0.128 143  9.085 <.0001
B160 - B40  0.9924 0.125 143  7.910 <.0001
B160 - B80  0.1078 0.126 143  0.858 0.9558
B160 - FERT -0.8083 0.125 143 -6.480 <.0001
```

...Continuación.

B160 - TEST 1.1482 0.131 143 8.743 <.0001
B20 - B40 -0.1746 0.125 143 -1.395 0.7300
B20 - B80 -1.0591 0.125 143 -8.477 <.0001
B20 - FERT -1.9752 0.126 143 -15.670 <.0001

B20 - TEST -0.0187 0.125 143 -0.150 1.0000
B40 - B80 -0.8846 0.124 143 -7.120 <.0001
B40 - FERT -1.8007 0.124 143 -14.477 <.0001
B40 - TEST 0.1558 0.127 143 1.230 0.8216
B80 - FERT -0.9161 0.124 143 -7.360 <.0001
B80 - TEST 1.0404 0.126 143 8.231 <.0001
FERT - TEST 1.9565 0.128 143 15.272 <.0001

P value adjustment: tukey method for comparing a family of 6 estimates

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

\$statistics

MSerror Df Mean CV MSD
0.1928841 143 6.468133 6.789992 0.3588412

\$parameters

test name.t ntr StudentizedRange alpha
Tukey MACETA 6 4.085302 0.05

\$means

	Yi	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75
B160	7.1736	0.5531868	25	6.3	8.7	6.8	7.10	7.4
B20	5.5760	0.6514599	25	4.3	7.1	5.2	5.40	6.0
B40	5.9500	0.5809475	25	4.8	6.9	5.5	6.00	6.4
B80	6.8120	0.5875940	25	5.9	8.2	6.5	6.60	7.1
FERT	7.8332	0.7721276	25	5.8	8.9	7.6	7.83	8.4
TEST	5.4640	0.7307986	25	3.9	6.6	4.9	5.50	6.1

\$comparison

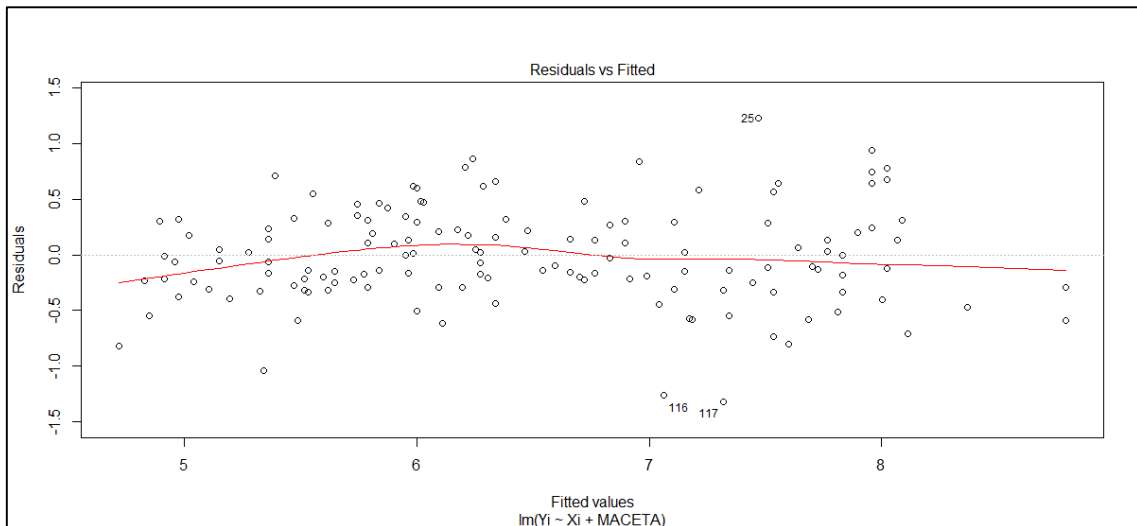
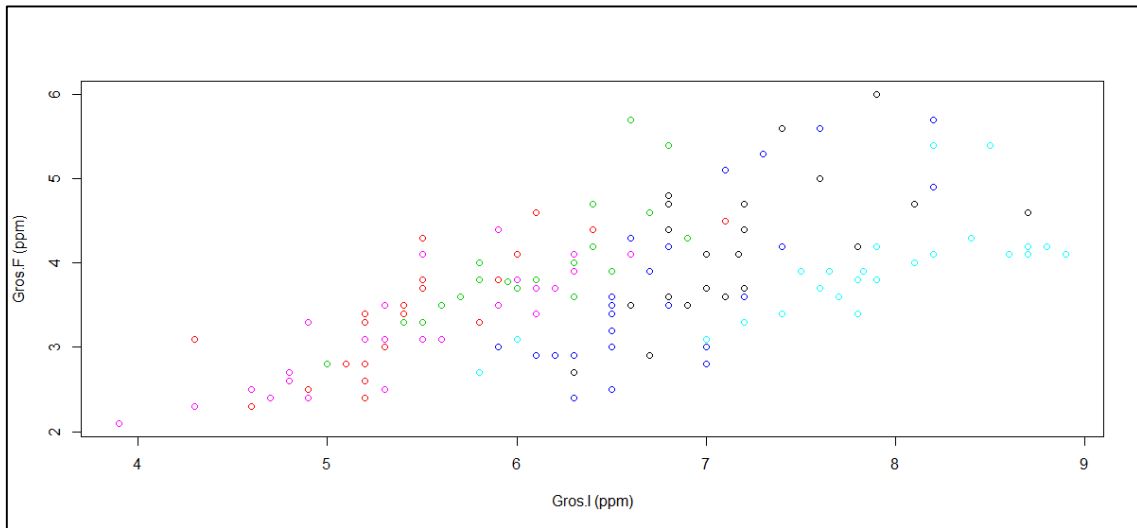
NULL

\$groups

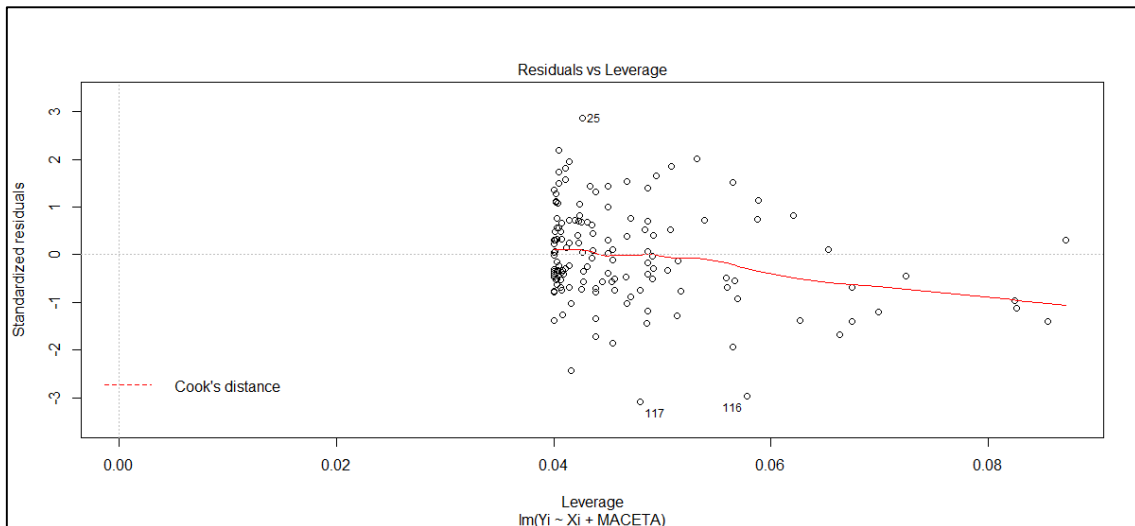
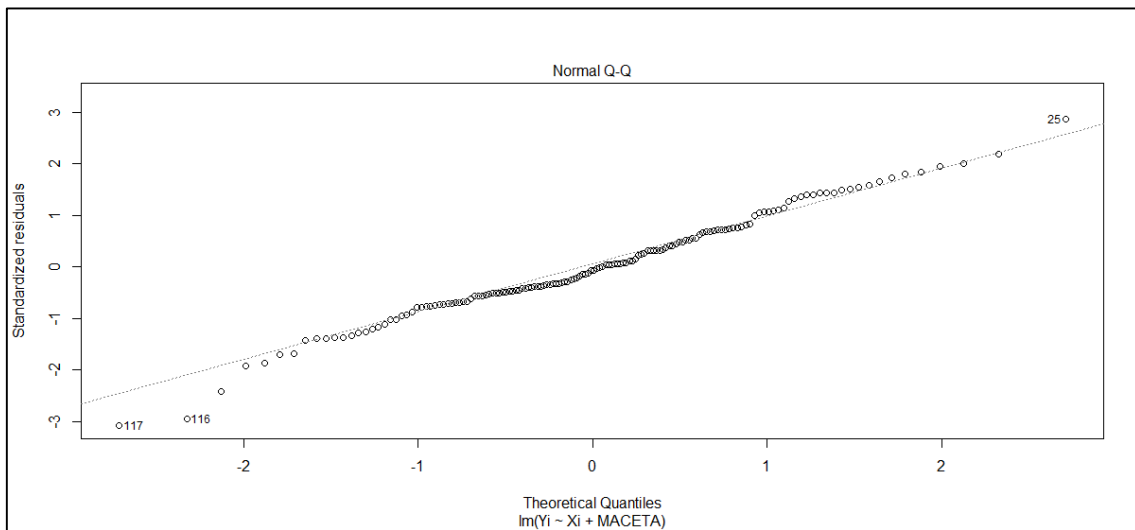
	Yi	groups
FERT	7.8332	a
B160	7.1736	b
B80	6.8120	c
B40	5.9500	d
B20	5.5760	e
TEST	5.4640	e

attr("class")
[1] "group"

...Continuación.



...Continuación.



ANEXO 10: Análisis estadístico para la biomasa aérea de las plantas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuales

W = 0.97371, p-value = 0.6448

```
> bartlett.test(residuales~MACETA,data=Bioarea)
```

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales by MACETA

Bartlett's K-squared = 8.8749, df = 5, p-value = 0.1142

```
> library(multcomp)
```

```
> library(agricolae)
```

```
> tukeytest<-HSD.test(modelo, trt="MACETA")
```

```
> tukeytest
```

```
$statistics
```

```
MSerror Df Mean CV MSD
```

```
0.3100967 24 7.446933 7.477753 1.088951
```

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

```
$parameters
```

```
test name.t ntr StudentizedRange alpha
```

```
Tukey MACETA 6 4.372651 0.05
```

```
$means
```

```
Aérea std r Min Max Q25 Q50 Q75
```

```
B160 7.9442 0.7613506 5 7.167 8.709 7.201 7.940 8.704
```

```
B20 5.7904 0.5852891 5 5.120 6.520 5.265 5.980 6.067
```

```
B40 6.4564 0.5927738 5 6.107 7.512 6.177 6.241 6.245
```

```
B80 8.1340 0.1172263 5 8.011 8.300 8.053 8.103 8.203
```

```
FERT 10.8392 0.5070510 5 10.319 11.527 10.416 10.776 11.158
```

```
TEST 5.5174 0.5622622 5 4.656 6.088 5.280 5.758 5.805
```

```
$comparison
```

```
NULL
```

```
$groups
```

```
Aérea groups
```

```
FERT 10.8392 a
```

```
B80 8.1340 b
```

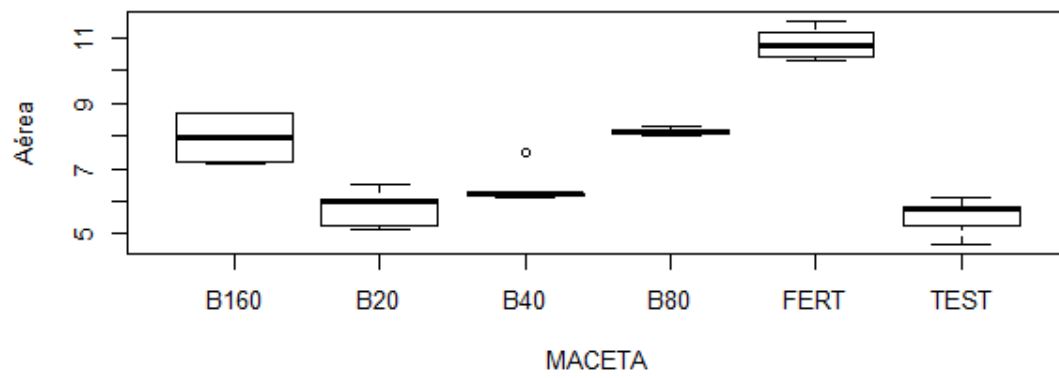
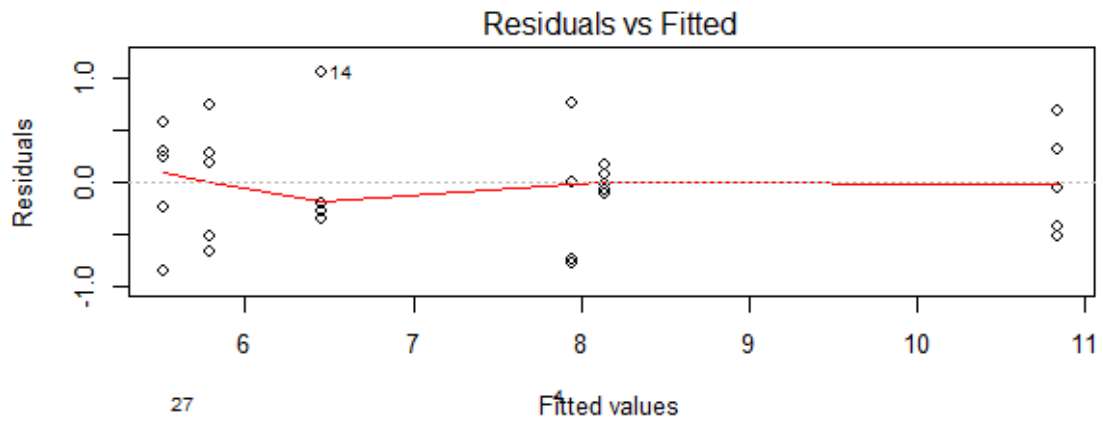
```
B160 7.9442 b
```

```
B40 6.4564 c
```

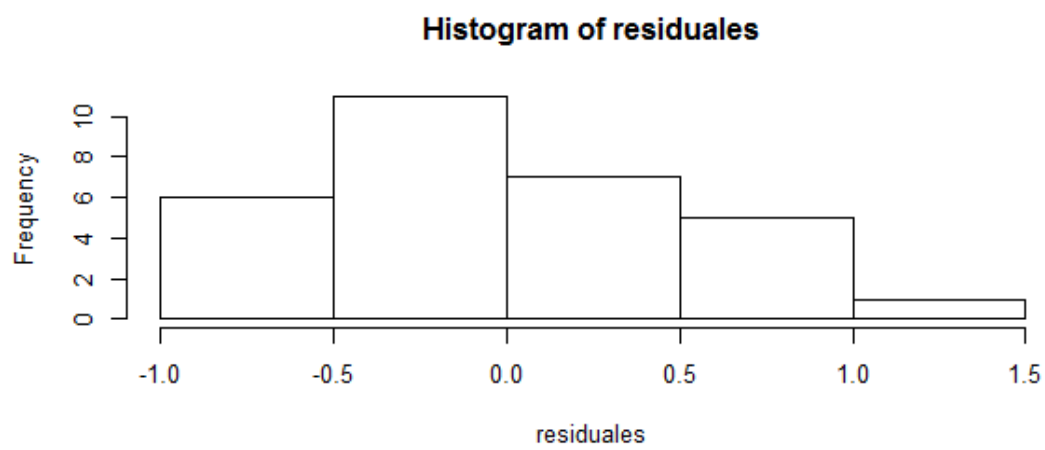
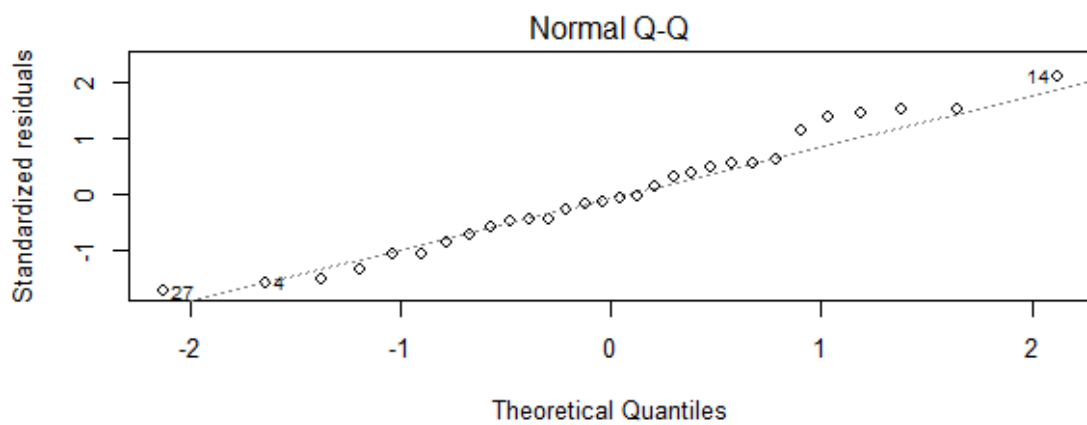
```
B20 5.7904 c
```

```
TEST 5.5174 c
```

...Continuación.



...Continuación.



ANEXO 11: Análisis estadístico para la biomasa radicular de las plantas de *Zea mays* L. generado por el paquete estadístico R.

Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

data: residuales

W = 0.98852, p-value = 0.9814

```
> bartlett.test(residuales~MACETA,data=Bioradicular)
```

Prueba de Bartlett de Homogeneidad de Varianzas

data: residuales by MACETA

Bartlett's K-squared = 8.0451, df = 5, p-value = 0.1538

```
> library(multcomp)
```

```
> library(agricolae)
```

Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

\$statistics

MSerror	Df	Mean	CV	MSD
0.258689	24	5.9135	8.60091	0.9946008

\$parameters

test name	t	ntr	StudentizedRange	alpha
Tukey	MACETA	6	4.372651	0.05

\$means

	Radicular	std	r	Min	Max	Q25	Q50	Q75
B160	6.1928	0.6720325	5	5.324	6.941	5.866	6.039	6.794
B20	4.9100	0.7161484	5	4.186	5.927	4.257	5.060	5.120
B40	5.5788	0.5485446	5	4.973	6.219	5.036	5.795	5.871
B80	6.5978	0.2408209	5	6.345	6.897	6.411	6.538	6.798
FERT	7.7452	0.4295605	5	7.277	8.161	7.322	7.819	8.147
TESTIGO	4.4564	0.2102850	5	4.191	4.765	4.373	4.435	4.518

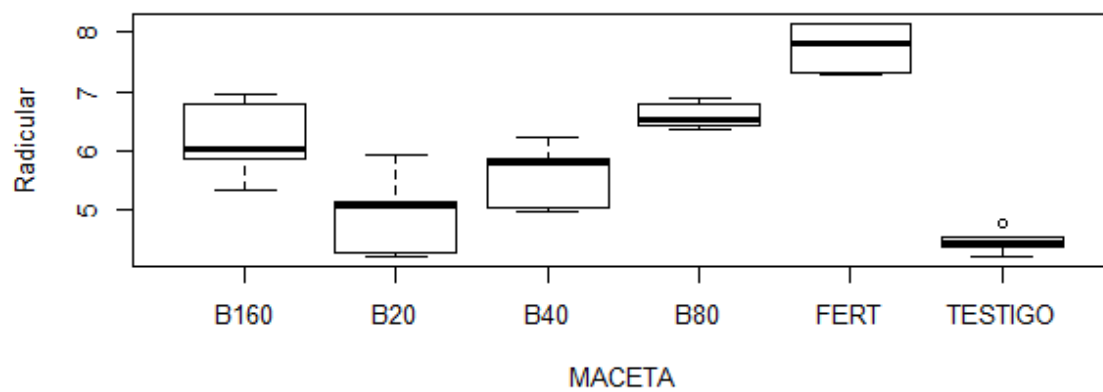
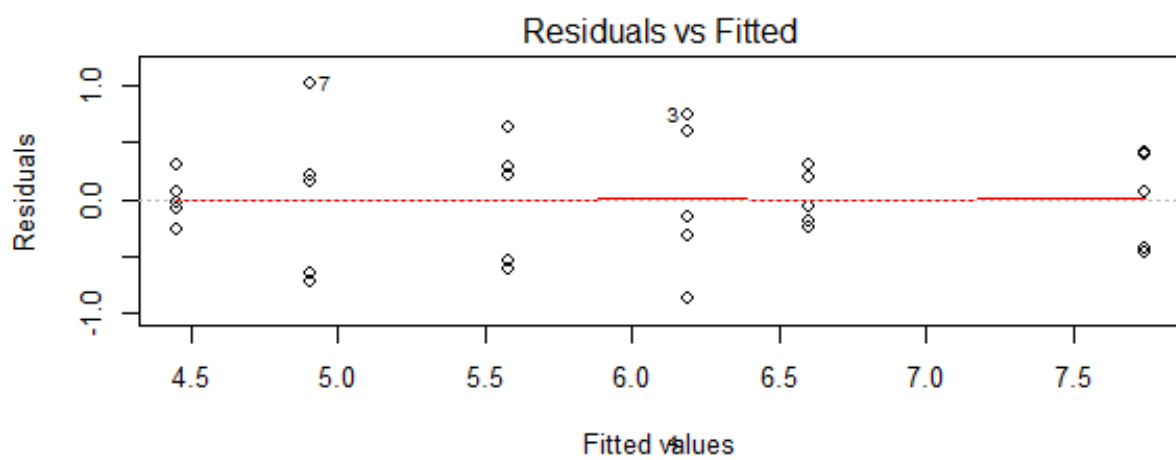
\$comparison

NULL

\$groups

	Radicular	groups
FERT	7.7452	a
B80	6.5978	b
B160	6.1928	bc
B40	5.5788	cd
B20	4.9100	de
TESTIGO	4.4564	e

...Continuación.



...Continuación.

