

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES**



**“APLICACIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE BIOMASA
RESIDUAL DE EUCALIPTO PARA EVALUAR LA
PRODUCTIVIDAD CON MAÍZ EN EL AUSTRO
ECUATORIANO”**

Presentada por:

SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES**

Lima - Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
AMBIENTALES**

**“APLICACIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE BIOMASA
RESIDUAL DE EUCALIPTO PARA EVALUAR LA
PRODUCTIVIDAD CON MAÍZ EN EL AUSTRO
ECUATORIANO”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR

Doctoris Philosophiae

Presentada por:

SERGIO FERNANDO IGLESIAS ABAD

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. César Pizardi Díaz
PRESIDENTE

Ph.D. Julio Alegre Orihuela
PATROCINADOR

Ph.D. Héctor Gonzales Mora
MIEMBRO

Dr. Edgar Sánchez Infantas
MIEMBRO

Ph.D. Alfonso Pablo Huerta Fernández
MIEMBRO EXTERNO

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.	Biochar.....	5
2.1.1.	Características del biochar	5
2.1.2.	Aplicaciones agrícolas y ambientales	6
2.1.3.	Ventajas del uso del carbón vegetal en el suelo.....	7
2.2.	Biomasa.....	8
2.2.1.	Características generales	8
2.2.2.	Biomasa residual de eucalipto.....	8
2.2.3.	Composición de la biomasa de eucalipto	10
2.2.4.	Efectos ambientales por la quema de biomasa.....	13
2.3.	El eucalipto	15
2.3.1.	Características generales	15
2.3.2.	Utilidad de la especie	17
2.3.3.	Ecosistema del eucalipto	19
2.3.4.	Efectos alelopáticos del eucalipto.....	20
2.3.5.	El Eucalipto en el austro del Ecuador	21
2.4.	El maíz	22
2.4.1.	Características generales	22
2.4.2.	Utilidad de la gramínea	24
2.4.3.	El cultivo del maíz	24
2.4.4.	Descripción de la variedad “ <i>Mishqui Sara 103</i> ”	26
2.4.5.	Manejo agronómico del cultivo	31

III. MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.1. Zona de estudio	36
3.2. Población y muestra	37
3.2.1. Población.....	37
3.2.2. Muestra.....	37
3.3. Instrumentos y equipos usados en el ensayo.....	38
3.4. Elaboración del biochar	39
3.4.1. Recolección de la biomasa residual de eucalipto.....	39
3.4.2. Determinación de las condiciones de pirólisis a nivel experimental	39
(a) Pirólisis rápida	40
(b) Pirólisis lenta	40
3.5. Pruebas de germinación en semillas de maíz.....	41
3.5.1. Semillas utilizadas.....	41
3.5.2. Pruebas preliminares de germinación	41
3.5.3. Preparación de la fase sólida para las diluciones	42
3.5.4. Elaboración de diluciones	43
3.5.5. Germinación de las semillas y datos tomados	44
3.6. Elaboración del biochar para el cultivo	45
3.6.1. Cálculo del material requerido para el cultivo	45
3.6.2. Preparación de biochar por el método de pirólisis rápida en horno.....	46
Para la construcción del horno de pirólisis,.....	46
3.6.3. Preparación de biochar por el método de pirólisis lenta bajo tierra.....	47
3.6.4. Trituración, clasificación y pesaje y del biochar.....	47
3.7. Siembra del cultivo de maíz.....	48
3.7.1. Condiciones de la siembra	48
3.7.2. Variedad de semilla utilizada.....	49
3.8. Análisis de laboratorio	49

3.9.	Tipo y enfoque de investigación	51
3.9.1.	Tipo de investigación	51
3.9.2.	Variables	51
3.9.3.	Tratamientos.....	52
3.10.	Diseño procedimental	53
3.10.1.	Diseño experimental.....	53
3.10.2.	Métodos estadísticos utilizados	54
3.10.3.	Inferencia estadística	54
3.11.	Análisis de datos en campo.....	55
3.11.1.	Rendimiento en peso de granos de mazorca ($t\ ha^{-1}$).....	55
3.11.2.	Rendimiento en peso de choclos ($t\ ha^{-1}$)	55
3.11.3.	Índice de área foliar (IAF).....	56
3.11.4.	Peso de biomasa en materia seca (MS) ($t\ ha^{-1}$)	57
3.11.5.	Altura de plantas (m) y diámetro de tallos (cm).....	58
3.11.6.	Densidad y porosidad del suelo.....	58
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
4.1.	Elaboración de biochar a nivel experimental.....	61
4.1.1.	Pruebas en horno a diferentes temperaturas.....	61
4.1.2.	Resultados obtenidos.....	62
(a)	Pirólisis rápida.....	62
(b)	Pirólisis lenta.....	62
4.1.3.	Relación porcentual del biochar obtenido y la biomasa pirolizada	63
4.2.	Caracterización del biochar y pruebas de germinación	64
4.3.	Estudios de biomasa y biochar.....	64
4.3.1.	Análisis químicos de Biomasa y biochar	64
4.3.2.	Análisis estadísticos de componentes principales para biomasa y biochar	69
4.3.3.	Resultados de las pruebas de germinación.....	71

4.3.4. Determinación de la dosis a ser aplicada en campo	75
4.4. Rendimientos del cultivo de maíz con biochar	76
4.4.1. Rendimiento en peso de granos de mazorca ($t\ ha^{-1}$)	76
4.4.2. Rendimiento en peso de choclo ($t\ ha^{-1}$)	78
4.4.3. Índice de área foliar (IAF)	80
4.4.4. Peso de biomasa en materia seca (MS) ($t\ ha^{-1}$)	82
4.4.5. Altura de plantas (m)	84
4.4.6. Diámetro de tallos (cm)	85
4.4.7. Contenido de macronutrientes (N-P-K) del grano	87
4.4.8. Análisis de proteína en el grano del maíz	88
4.4.9. Análisis de suelos de los tratamientos	89
4.4.10. Densidad aparente y porosidad del suelo	94
4.5. Análisis económico de los tratamientos	97
4.5.1. Análisis económico	97
4.5.2. Jerarquización de los tratamientos por beneficio neto	100
V. CONCLUSIONES	102
VI. RECOMENDACIONES	104
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
VIII. ANEXOS	118

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Clasificación botánica del <i>Eucalyptus globulus</i>	16
Cuadro 2: Clasificación botánica del <i>Zea mays</i>	23
Cuadro 3: Características morfológicas de la variedad	27
Cuadro 4: Características agronómicas	28
Cuadro 5: Características de calidad	29
Cuadro 6: Comparación de materiales en choclo	29
Cuadro 7: Rendimiento ajustado al 13% de humedad en varias localidades	30
Cuadro 8: Rendimiento $t\ ha^{-1}$ ajustado al 13% de humedad de 3 variedades y un híbrido experimental en 3 localidades.....	30
Cuadro 9: Coordenadas de ubicación del cultivo	36
Cuadro 10: Instrumentos y equipos utilizados	38
Cuadro 11: Tratamientos analizados	43
Cuadro 12: Dosis de dilución utilizadas	43
Cuadro 13: Características analizadas durante las pruebas de germinación	44
Cuadro 14: Requerimiento total de biochar para el cultivo.....	45
Cuadro 15: Normas utilizadas en los análisis	50
Cuadro 16: Variables de estudio.....	51
Cuadro 17: Combinación de tratamientos y codificación	53
Cuadro 18: Caracterización de la biomasa y biochar obtenidos.....	64
Cuadro 19: Medias ajustadas y errores estándares para peso de grano seco.....	76
Cuadro 20: Pruebas de hipótesis para contrastes de rendimiento entre tratamientos.....	77
Cuadro 21: Medias ajustadas y errores estándares para peso de grano seco.....	78
Cuadro 22: Pruebas de hipótesis para contrastes de rendimiento entre tratamientos.....	79
Cuadro 23: Medias ajustadas y errores estándares para IAF.....	80
Cuadro 24: Pruebas de hipótesis para contrastes de IAF entre tratamientos.....	81
Cuadro 25: Medias ajustadas y errores estándares para peso de biomasa MS	82
Cuadro 26: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre tratamientos.....	83
Cuadro 27: Medias ajustadas y errores estándares para altura de plantas	84
Cuadro 28: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre tratamientos.....	84

Cuadro 29: Medias ajustadas y errores estándares para diámetro de tallos.....	86
Cuadro 30: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre tratamientos.....	86
Cuadro 31: Caracterización del suelo en los diferentes tratamientos.....	90
Cuadro 32: Medias ajustadas y errores estándares para densidad aparente	94
Cuadro 33: Pruebas de hipótesis para contrastes de densidad aparente	95
Cuadro 34: Porosidad del suelo (%).....	96
Cuadro 35: Análisis económico por hectárea del cultivo de maíz con biochar (USD)	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa conceptual de la investigación	4
Figura 2: Ubicación de la zona de estudio.....	37
Figura 3: Diseño de la parcela experimental	38
Figura 4: Resultados del biochar procesado de forma experimental.....	41
Figura 5: Pruebas de germinación en diluciones	45
Figura 6: Horno de pirólisis y biochar producido.....	46
Figura 7: Elaboración de biochar bajo tierra	47
Figura 8: Triturado manual del biochar	48
Figura 9: Siembra de los tratamientos	49
Figura 10: Desarrollo del cultivo.....	49
Figura 11: Cosecha de mazorcas y pesaje del grano	55
Figura 12: Cosecha de maíz en choclo	56
Figura 13: Medidas del índice de área foliar	57
Figura 14: Peso de la biomasa del maíz	57
Figura 15: Medida de la altura y diámetro de plantas	58
Figura 16: Toma de muestras en campo para la densidad.....	59
Figura 17: Esquema metodológico	60
Figura 18: Influencia de la temperatura en la ceniza del biochar	62
Figura 19: Relación porcentual de biochar obtenido.....	63
Figura 20: Niveles de pH en biomasa y biochar.....	65
Figura 21: Conductividad eléctrica en biomasa y biochar (dS/m)	66
Figura 22: Porcentaje de nitrógeno para biomasa y biochar	66
Figura 23: Porcentaje de fósforo para biomasa y biochar (P ₂ O ₅).....	67
Figura 24: Porcentaje de potasio para biomasa y biochar (K ₂ O)	67
Figura 25: Porcentaje de cenizas para biomasa y biochar	68
Figura 26: Porcentaje de carbono total para biomasa y biochar.....	68
Figura 27: Capacidad de intercambio catiónico CIC (meq/100g).....	69
Figura 28: Análisis de componentes principales para biomasa y biochar	70
Figura 29: Potencia hidrógeno (pH) de las diluciones	71

Figura 30: Conductividad eléctrica de las diluciones (mS/cm ²).....	72
Figura 31: Total de germinación de radículas a las 60 horas	73
Figura 32: Total de germinación de gémulas a las 84 horas	74
Figura 33: Crecimiento de plántulas hasta la valla de los siete cm	75
Figura 34: Medias de rendimiento para peso de grano seco (t ha ⁻¹).....	77
Figura 35: Medias de rendimiento para peso de choclo (t ha ⁻¹)	79
Figura 36: Medias del índice de área foliar	81
Figura 37: Medias de rendimiento para peso de biomasa MS (t ha-1).....	83
Figura 38: Medias de altura de planta (m).....	85
Figura 39: Medias de diámetro de tallo (cm)	87
Figura 40: Análisis de componentes principales para nitrógeno, fósforo y potasio.....	87
Figura 41: Análisis de porcentaje de proteína en grano.	88
Figura 42: Análisis de componentes principales del suelo para tratamientos	91
Figura 43: Carbono retenido en el suelo por tratamiento (t ha ⁻¹)	92
Figura 44: Niveles de pH en suelo por tratamiento	92
Figura 45: Porcentaje de nitrógeno en los tratamientos	93
Figura 46: Contenido de fósforo en los tratamientos	94
Figura 47: Medias de densidad aparente (g/cm ³)	95
Figura 48: Comparación del beneficio neto en los tratamientos	100

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Distribución de tratamientos aleatorizados y repeticiones	118
ANEXO 2: Métodos utilizados en los análisis de laboratorio.....	119
ANEXO 3: Resultados del modelo estadístico: Análisis para biomasa y biochar	120
ANEXO 4: Resultados del modelo estadístico: Rendimiento de mazorca (t ha ⁻¹).....	121
ANEXO 5: Cálculo de rendimientos ajustados a la humedad (CIMMYT).....	122
ANEXO 6: Resultados del modelo estadístico: Rendimiento en peso de choclo (t ha ⁻¹)..	124
ANEXO 7: Resultados del modelo estadístico para el índice de área foliar (IAF)	125
ANEXO 8: Resultados del modelo estadístico Peso de biomasa (MS) (t ha ⁻¹).....	126
ANEXO 9: Resultados del modelo estadístico para altura de plantas (m).....	127
ANEXO 10: Resultados del modelo estadístico para diámetro de plantas (cm).....	128
ANEXO 11: Resultados del modelo estadístico: Análisis para N-P-K en grano	129
ANEXO 12: Resultados del modelo estadístico: Análisis químico de suelos.....	130
ANEXO 13: Resultados del modelo estadístico: Ddensidad aparente y porosidad	131
ANEXO 14: Costos de producción de maíz variedad <i>Mishqui Sara</i>	132

RESUMEN

La investigación fue realizada en la zona austral andina de la república del Ecuador, tuvo como objetivo determinar la viabilidad de la utilización de biochar, elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill), mediante dos métodos de pirólisis, validándolo en la productividad del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) y la respuesta en el suelo agrícola como mejorador de condiciones edáficas y fijador de carbono. El estudio tuvo como metodologías: los procedimientos para la elaboración del biochar, la determinación a nivel de laboratorio de las características físicas y químicas de los tipos de biochar, además se realizaron pruebas de germinación en semillas de maíz para establecer las dosis de aplicación en el cultivo. Subsiguientemente se desarrolló a nivel agronómico la validación del biochar aplicado al suelo en el cultivo de maíz en forma de enmienda, para determinar la relación de sus propiedades potenciales sobre la productividad de los suelos en la Estación Experimental del Austro, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP). Los análisis se realizaron en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria La Molina de Lima-Perú (UNALM). Bajo las condiciones estudiadas se encontraron tendencias de incremento en los rendimientos y proteína del grano del maíz con el uso del biochar de eucalipto, así como otras características fenológicas de crecimiento y se espera que la respuesta de este biocarbón tenga efectos residuales a mediano y largo plazo para posteriores cultivos. Otro aspecto concluyente fue los cambios que se producen a nivel de las características del suelo, determinadas en análisis comparativos de las condiciones antes y después del cultivo, Posteriormente se estableció la viabilidad de aplicación de biochar, fundamentando en el análisis estadístico y económico de los resultados, para establecer una propuesta de gestión en los sistemas integrados de eucalipto y maíz.

Palabras clave: Biocarbón, pirólisis, biomasa de maíz, índice de área foliar.

ABSTRACT

The research was conducted in the southern Andean region of the Republic of Ecuador, aimed to determine the feasibility of using biochar, made from residual biomass of eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill), using two methods of pyrolysis, validating it in the productivity of the corn crop (*Zea mays* L.) and the response in the agricultural soil as a soil conditioner and carbon fixer. The methodologies used in the study, where the following: the procedures that were carried out during the elaboration of the biochar and to determine the physical and chemical characteristics of the different types of biochar in a laboratory. In addition, germination tests were carried out on corn seeds to establish the doses of application in the culture. Subsequently, the validation of the biochar applied to the soil in the corn crop in the form of an amendment was developed at an agronomic level, in order to determine the relationship of its potential properties in regards to the productivity of the soils in the Austro Experimental Station, of the Institute of Agricultural Research of the Ecuador (INIAP). These analyzes were carried out in the laboratories of the Universidad Nacional Agraria La Molina of Lima-Perú (UNALM). Under the studied conditions, it was found that there were trends of increase in corn grain yields and protein with the use of eucalyptus biochar, as well as other phenological growth characteristics and it is expected that the response of this biochar will have residual effects in the medium and long term for later crops. Another conclusive aspect was the changes that occur in regards to the soil characteristics, determined in comparative analysis of the conditions before and after the crop. Subsequently, the viability of applying biochar was established, based on the statistical and economic analysis of the results, in order to establish a management proposal of integrated eucalyptus and corn systems.

Keywords: Biochar, pyrolysis, corn biomass, leaf area index.

I. INTRODUCCIÓN

El equilibrio de los ecosistemas es un aspecto fundamental para garantizar la subsistencia de las especies y por consiguiente las condiciones de habitabilidad de los seres humanos. En este contexto el uso adecuado de los sistemas agroforestales resulta de fundamental importancia, ya que involucra la responsabilidad en la gestión los recursos naturales como biodiversidad, agua, aire y suelo. Este último considerado la base de la alimentación humana y el sumidero de carbono en el ciclo natural de este elemento.

La incesante presión sobre los recursos naturales es un hecho confirmado en casi todas las latitudes del planeta y sus consecuencias repercuten en todas las formas vivientes ya que generan un círculo de sobreexplotación que limita la capacidad de recuperación natural de los ecosistemas, especialmente los que integran árboles y cultivos interactuando en forma simultánea o con alternancia en un sistema agroforestal (Timoteo *et al.*, 2016).

En la serranía andina de América del sur, el fenómeno de sobreexplotación de los cultivos se ha intensificado, debido a la fragilidad de sus agroecosistemas y las deficientes prácticas de manejo de especies, especialmente a consecuencia de la mayor demanda de alimentos, ocasionando la ampliación de la frontera agrícola para el cultivo de especies ancestrales como el maíz (*Zea mays* L.) que es la fuente alimenticia de estas poblaciones y las pocas especies forestales presentes como el eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) que se han insertado en el ciclo agroforestal de sus cultivos.

Uno de los problemas que se producen por el uso de esta especie forestal introducida, consiste en que la biomasa residual del eucalipto conformada por ramas, cortezas externas (ritidoma) y hojas, que se desprenden naturalmente, por las características genéticas de la variedad; se descomponen en el mismo sitio donde se depositan, ocasionando problemas de acidificación del suelo y alelopatía para otros cultivos. Además la vulnerabilidad que tiene la biomasa seca para inflamarse, causa graves alteraciones a la estructura del suelo y daños al ambiente por la abundante generación de CO₂ a la atmósfera (Arellano y Castillo-Guevara, 2014; Iglesias, 2014; Abdelmigid y Morsi, 2017).

Frente a este problema, es importante analizar nuevas formas de manejo de la biomasa como es el biochar (biocarbón), para evitar el desperdicio de fuentes alternas de fertilización orgánica y generar la recirculación de nutrientes en el mismo sitio, las que proporcionen alternativas factibles en el campo ambiental, que lleven a condiciones de mayor productividad de los cultivos andinos y al mismo tiempo permitan la conservación de las especies forestales asociadas. La elaboración de biochar en la zona austral de la república del Ecuador, podría considerarse como una estrategia conveniente para estimular la agricultura y proyectar un nuevo modelo de agricultura sostenible.

Ante a la necesidad de gestionar sosteniblemente los sistemas agrícolas asociados, existen experiencias exitosas sobre el uso del biochar, como una estrategia viable de tratamiento de la biomasa residual de los sistemas agroforestales, que tiene las ventajas de recircular nutrientes *in situ* y mejorar las condiciones físico químicas y biológicas de suelo, además la conformación física y química del biochar, aporta en la importante estrategia ambiental de secuestrar carbono al interior de la estructura del suelo (Yadav *et al.*, 2016; Yeboah *et al.*, 2016).

Aún no existe en la zona austral del Ecuador, suficiente indagación sobre el uso del biochar como potencializador de los cultivos, por lo que es fundamental abrir un proceso de exploración de alternativas, que propicien las soluciones a los problemas productivos y de conservación del suelo a base de esta tecnología. Lo antedicho proporciona fundamentos para continuar realizando investigaciones de orden científico sobre este tema, aportando al desarrollo productivo y de gestión ambiental y que puedan ser replicables en los países andinos que tienen similitud de condiciones agroecológicas.

En la actualidad hay una preocupación generalizada de científicos, centros de investigación agropecuaria y universidades que trabajan con tecnologías para favorecer el incremento de los cultivos de una manera sustentable y que proporcionen alternativas de manejo integral de componentes de los sistemas agroforestales rurales (Gonzalez Gamboa *et al.*, 2010).

El trabajo “Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano”, propone establecer un modelo alternativo de utilización de la biomasa residual de eucalipto conformada por ramas y cortezas externas (ritidoma), para reducir los daños a la estructura superficial del suelo y la quema *in situ*, que es tan perjudicial para el ecosistema y más bien aprovechar esos residuos transformándolos

en biochar para incorporarlos en los cultivos tradicionales como es el maíz, mejorando el rendimiento y las condiciones del suelo, contribuyendo de esta manera a la búsqueda de la soberanía alimentaria de las comunidades locales.

Objetivo General

Determinar la viabilidad de la utilización de biochar, elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto conformada por: ramas y cortezas externas (ritidoma), mediante dos métodos de pirólisis (rápida en horno y lenta bajo tierra), validándolo en la productividad del cultivo del maíz y su efecto en el suelo agrícola, en el austro ecuatoriano.

Objetivos específicos

- Desarrollar a nivel de campo procedimientos para la elaboración de biochar a partir de ramas y cortezas de eucalipto (biomasa residual), mediante procedimientos de pirólisis rápida y lenta.
- Determinar en laboratorio las características físicas y químicas de los tipos de biochar, obtenidos a partir de los procedimientos de combustión y biomasa utilizada, además realizar pruebas de germinación en semillas de maíz, para establecer las dosis de aplicación en el cultivo de campo.
- Validar a nivel agronómico el comportamiento de los tipos de biochar, incorporado al suelo en el cultivo de maíz, para determinar la relación de sus propiedades potenciales sobre la productividad y el efecto en los suelos.
- Establecer la viabilidad de esta práctica de enmienda al suelo, fundamentándola en el análisis económico y de los procedimientos agronómicos realizados.

ESQUEMA CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

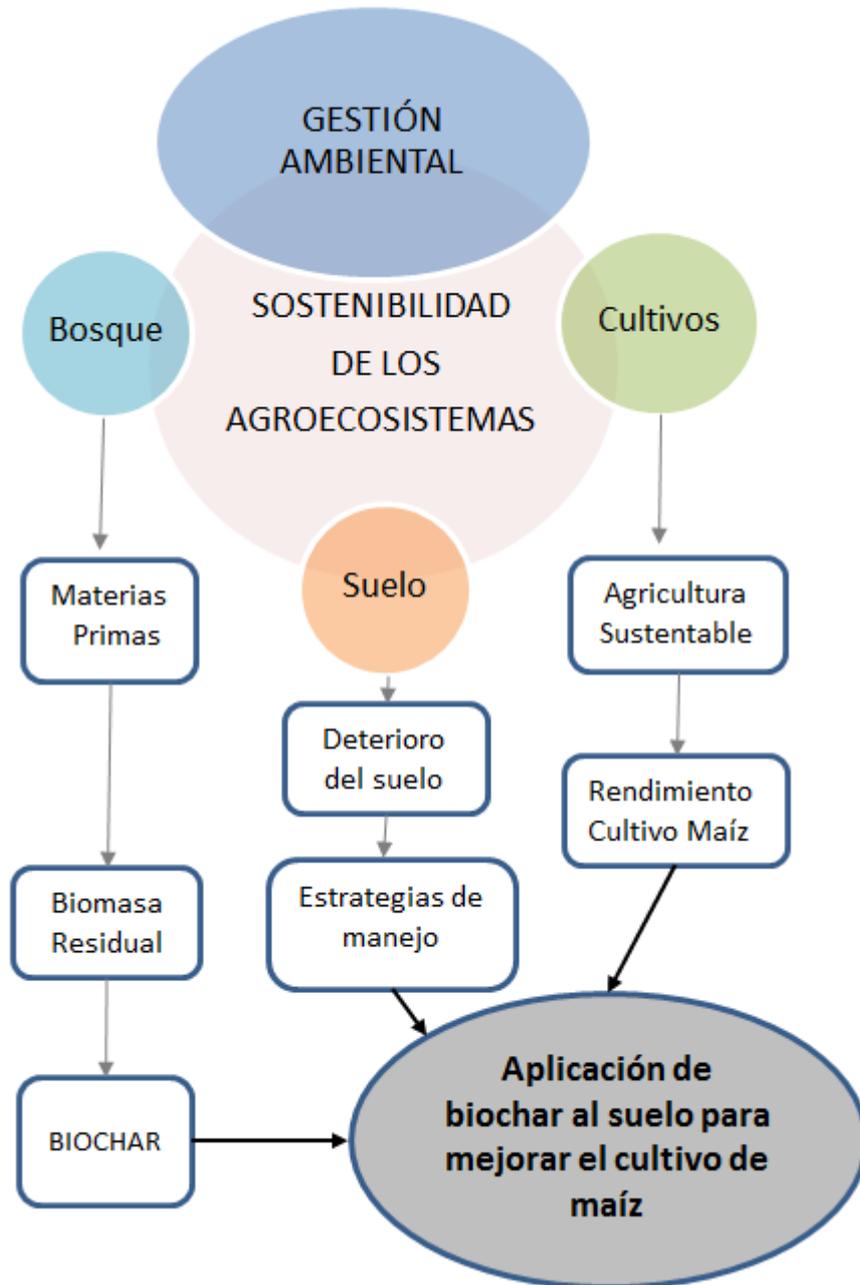


Figura 1: Mapa conceptual de la investigación

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. BIOCHAR

2.1.1. Características del biochar

El biochar (biocarbón) se produce por la transformación mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica (pirólisis) de la biomasa a temperaturas de 350-500°C, lo que promueve un material rico en contenido de carbono y cenizas, que se devuelven al suelo, mejorando las condiciones del mismo. En la actualidad el uso de biochar en varios cultivos agrícolas ha cobrado notoriedad, como una forma de reciclar nutrientes y gestionar ecosistemas agrícolas, incidiendo en la lucha contra la pérdida de suelo forestal y agrícola, mejorando su fertilidad y evitando su empobrecimiento (Gilces Reyna, 2014).

La práctica de quemar los residuos de la biomasa de las especies vegetales es muy antigua y estaba destinada a reincorporar nutrientes al suelo y sanear los cultivos de plagas y enfermedades. El biochar o biocarbón, se ha relacionado con la gestión del suelo llevada a cabo por diferentes culturas amerindias antes de la llegada de los europeos, como la “*terra preta*” en Brasil y la utilización ancestral de las cenizas de los fogones, producto de la cocción de alimentos con leña para ser aplicados a las chacras. El uso del biocarbón es una tecnología que ha demostrado proveer beneficios al suelo, aumentando su fertilidad a través de la influencia en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Escalante *et al.*, 2016).

Desde hace unos pocos años, se ha propuesto intensificar el uso del biochar, como una estrategia viable de tratamiento de la biomasa residual de los sistemas agroforestales, que tiene las ventajas de recircular nutrientes *in situ* y mejorar las condiciones físico químicas y biológicas de suelo aplicándolo como enmienda, además contribuye en el mantenimiento de los nutrientes al interior de la estructura del biochar (Gilces Reyna, 2014; Jeffery *et al.*, 2015).

Torres-Sallan *et al.* (2014) expresan que biochar es el carbón obtenido de restos de biomasa, destinado a mejorar la fertilidad del suelo y contribuir al secuestro de carbono en la estructura del mismo. El carbón vegetal es un producto de la combustión de biomasa que tiene

diferentes usos, el biochar es un producto alto en contenido de carbono que puede ser producido en hornos, tras calentar biomasa como madera u hojas en un contenedor con poco o ningún aire disponible. En términos generales el biochar se produce mediante transformación térmica de la materia orgánica con un bajo suministro de oxígeno y a temperaturas relativamente bajas de 350 a 650 °C, dependiendo del material de pirólisis (Sun *et al.*, 2017).

En la mayoría de los estudios realizados, las metodologías para la producción de biochar se han centrado en el proceso de pirólisis. Existen dos tipos de procesos: pirólisis lenta y pirólisis rápida. La pirólisis lenta es el tipo de tecnología más utilizado. Este proceso de elaboración es muy parecido al de la formación de carbón vegetal, que es una de las tecnologías más antiguas que la humanidad ha desarrollado simultáneamente en todas las regiones del planeta. En las investigaciones realizadas se han probado diferentes tipos de materiales para la elaboración incluyendo también biomasa de especies resinosas (Paco Abenza, 2012).

El beneficio de utilizar biochar en los cultivos, se sustenta en los cambios que produce dentro de los componentes de la estructura de la tierra, al respecto se ha demostrado que el uso de biocarbón (biochar) como enmienda edáfica puede mejorar las condiciones en el suelo a la vez que se corrigen algunas de sus propiedades (Alcañiz *et al.*, 2014; Crombie *et al.*, 2015).

El biochar es una de las prácticas innovadoras y actualmente recomendadas por la FAO (Food and Agriculture Organization), para mejorar las condiciones de suelo y contribuir a la afectación ambiental por el exceso de CO₂ (FAO, 2016). Actualmente se vienen realizando diversas gestiones y propuestas ante organismos de protección ambiental, con el objeto de conseguir bonos por el secuestro de carbono en el suelo, factor que potenciaría prácticas ambientales y conservacionistas como el biochar para hacer del suelo un sumidero del exceso de carbono existente.

2.1.2. Aplicaciones agrícolas y ambientales

El biochar tiene diferentes aplicaciones, pero principalmente se lo ha venido utilizando en la agricultura para mejorar las condiciones del suelo y propiciar el desarrollo de los cultivos. Sobre la aplicación de este producto, Alcañiz *et al.* (2014) dicen en cuanto a los cultivos que se han descrito efectos favorables sobre la producción y calidad de las cosechas. Paco Abenza (2012) en su trabajo de investigación, refiere que los diferentes tipos de biochar han

provocado un mayor desarrollo de la cebada, en comparación con la aplicación de sus respectivas materias primas.

Oses Orbegozo (2013) expone que el biocarbón combinado con la inoculación de *Bacillus subtilis*, mejora el crecimiento de plantas de tomate fertilizadas con compost orgánico, con un promedio de 13 por ciento, aumentando el peso seco aéreo de las plantas. Gilces Reyna (2014) expresa que las cenizas procedentes de la combustión completa de la madera son también utilizadas como fertilizantes, pues son ricas en elementos esenciales para las plantas, por lo que su devolución al suelo contribuye a completar el ciclo natural de los nutrientes.

Torres-Sallan *et al.* (2012) expresan que el biocarbón (biochar) es una forma de transferir menos contaminantes al subsuelo y acuíferos. Actualmente se están estudiando las propiedades que tiene el biochar como elemento de remediación ambiental, por su capacidad para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, bloqueo de hidrocarburos aromáticos policíclicos, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Hagner *et al.*, 2015; Frišták *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2015).

2.1.3. Ventajas del uso del carbón vegetal en el suelo

El biochar mejora la estructura y fertilidad del suelo, lo que conduce al incremento de la producción de biomasa. El biochar no solo acrecienta la retención y por lo tanto la eficiencia de los fertilizantes, también puede mediante el mismo mecanismo, reducir la pérdida de fertilizantes. Torres-Sallan *et al.* (2014) concluyen que se han descrito múltiples efectos en los suelos tratados con biochar como: mayor disponibilidad de agua, aumento de la retención de nutrientes y estímulo de la actividad microbiana, lo que se traduce en una mejora de la productividad agrícola.

El biochar también puede ser apropiado para contrarrestar los efectos acidificantes de la biomasa de algunas especies en el suelo. Gilces Reyna (2014) refiere que la influencia en el pH mostró un efecto alcalinizante, tanto de las cenizas cuanto del biochar. Los beneficios del biochar aplicado al suelo se han atribuido a la disminución en la densidad aparente, la mejora de la dinámica del agua al modificar la estructura del suelo y aumenta la capacidad de intercambio. Torres-Sallan *et al.* (2014) expresan que dada la elevada capacidad de absorción del biochar, se plantea la hipótesis de su utilidad para reducir las pérdidas por lixiviación del suelo, no tan solo de elementos minerales, sino también de materia orgánica soluble.

Guerra (2014) en la investigación realizada en la selva del Perú, dice que los beneficios de la adición de biochar se resumen en las mejoras de la retención e infiltración del agua del suelo, en su capacidad de intercambio catiónico, en la retención de nutrientes, el incremento de su pH, en la eficiencia del uso de nitrógeno, en la estimulación del crecimiento microbiano y sobre todo, en posibles efectos duraderos sobre el suelo por ser una forma estable de carbono altamente resistente a la degradación microbiana.

2.2. BIOMASA

2.2.1. Características generales

La biomasa es la materia orgánica originada en un proceso biológico, que puede ser utilizable como fuente de energía o como productos de transformación para diferentes fines. La biomasa es una forma de energía renovable que puede ser importante desde el punto de vista energético y ambiental y como un aporte para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales (Pozas, 2012). Para el caso de un árbol, la biomasa se define como la cantidad total de materia vegetal que lo forma, incluyendo sus componentes aéreos y subterráneos, mientras que si generalizamos al caso de una masa forestal, su biomasa constituiría la cantidad de materia vegetal de todos sus individuos. Se expresa generalmente en términos de peso seco, masa o volumen (Balboa, 2005).

La búsqueda de modelos ambientales alternativos, ha llevado a que en la actualidad se mire a la biomasa buscando soluciones energéticas y ambientales eficientes que permitan nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios entre los que se encuentra la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente de CO₂, uno de los causantes del efecto invernadero y SO₂ que ocasiona la lluvia ácida (Álvarez *et al.*, 2005). Sobre este aspecto, es importante tener en consideración que las transformaciones termoquímicas de material residual proveniente de las actividades agrícolas y forestales no afectan la seguridad alimentaria, lo que es un factor importante a la hora de evaluar los efectos sociales de las nuevas alternativas energéticas (Peña *et al.*, 2014).

2.2.2. Biomasa residual de eucalipto

En la actualidad existe un creciente interés en la utilización de la biomasa del eucalipto, tanto procedente de los tratamientos silvícolas, como de los procesos de industrialización, para destinarla a diferentes fines de explotación y utilización. Esta tendencia debe continuar y

aumentar, tomando en cuenta que existen numerosas iniciativas y tecnologías alternativas para el uso de la biomasa, como una oportunidad para rentabilizar aprovechamientos silvícolas y poner en valor terrenos con un nuevo uso del suelo (Dopazo Amoedo *et al.*, 2009). En la utilización de la biomasa de eucalipto, generalmente es necesario realizar una serie de operaciones previas de transformación física y acondicionamiento. Estas operaciones hacen posible obtener productos de un más alto valor añadido, lo que posibilita la comercialización y ampliación de sus productos derivados (Ortiz *et al.*, 2003).

En el caso específico de la variedad *Eucalyptus globulus*, los resultados obtenidos por el estudio Doctoral de Balboa (2005) revelaron significativa de acumulación de nutrientes en las fracciones arbóreas de la copa ya que realizan una importante retirada de nutrientes del suelo, por lo que se vuelve imprescindible el aprovechamiento sostenible de la biomasa arbórea. Entre las estrategias se encuentra el aprovechamiento de fracciones arbóreas no maderables para devolver al suelo los nutrientes extraídos, en aspectos íntimamente ligados al concepto de sostenibilidad, como pueden ser el empobrecimiento nutricional y la erosión del suelo, o la alteración del ciclo del carbono. Las conclusiones de este autor refieren que la mayor parte del N y P acumulado por la vegetación se encuentra en las ramas y la corteza, que también acumulan importantes cantidades de Ca, Mg y K.

La apreciación del alto contenido de nutrientes en la fracción no maderable del eucalipto, es concurrente con lo reportado por Martínez *et al.* (2006) que expresan que el 70 por ciento de los nutrientes extraídos por los árboles se concentran en las ramas, cortezas y hojas y el 30 por ciento en el fuste.

Para la estimación de la biomasa de eucalipto, se han desarrollado una serie de métodos tendientes a establecer la cantidad de biomasa aérea, tanto en volumen para la valoración del carbono retenido y las funciones ambientales, cuanto en peso de madera para la evaluación comercial. Además los niveles de incremento anual de las forestas para monitorear valores de incremento del rendimiento, sobre este aspecto el compendio El eucalipto en la repoblación Forestal de la FAO, analiza la situación del eucalipto en el mundo y establece que el incremento medio anual (IMA) puede variar entre las diferentes localidades y las desiguales calidades de sitio, indicando una alta variabilidad desde 1 m³ hasta 50 m³ ha⁻¹. Esta misma recopilación refiere que en el Perú, el IMA para los altiplanos es, por término medio, de 10 m³, mientras que en Uruguay se obtienen 25 m³ sobre sitios buenos (FAO, 1981).

El trabajo de investigación realizado en la cuenca alto andina del departamento de Amazonas en la selva peruana, fronterizo con el Ecuador, determinó para la variedad *Eucalyptus globulus* un total de biomasa vegetal para árboles vivos de 50.43 t ha⁻¹, de los cuales 26.29 t ha⁻¹ corresponden al componente de madera, mientras que 24.14 t ha⁻¹ pertenecen a la biomasa de la hojarasca (Villacis, 2012).

La tesis de maestría Factores que inciden en el rendimiento del *Eucalyptus globulus* y valoración ambiental en la subcuenca del río Burgay, localizada en la zona austral del Ecuador, estableció rendimientos en volumen de madera para árboles vivos en rangos de 568,45 a 1194,73 m³ ha⁻¹, con un promedio de 807,07 m³ ha⁻¹. En plantaciones sin manejo forestal (raleos y podas), de más de 20 años y con densidades de siembra de 1900 árboles por hectárea. Indicando además que los mayores volúmenes de madera se reportan en la cuenca media y baja, asegurando que a mayor altura disminuye el rendimiento para plantaciones de eucalipto en esta zona (Iglesias, 2014).

Como dato comparativo, en plantaciones debidamente manejadas en la península Ibérica, que tiene más de la mitad de los eucaliptos de mundo, se reportan rendimientos variables donde los valores de biomasa arbórea oscilan entre 142 y 426 t ha⁻¹, analizado en forestas entre 13 y 24 años y con densidades de 1200 a 1150 pies ha⁻¹ (Álvarez *et al.*, 2005).

Tradicionalmente los modelos más usados para la estimación de la biomasa han sido desarrollados principalmente para un rango estrecho de plantaciones puras y homogéneas, por lo que estas cuantificaciones pueden no ser adecuadas para sistemas agroforestales. El estudio realizado en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica, enfatiza en que se deben desarrollar modelos generales para la estimación de la biomasa aérea, en función de la arquitectura de cada especie además de las variables a nivel de árbol individual y las condiciones de sitio (Avendaño, 2008).

2.2.3. Composición de la biomasa de eucalipto

Los residuos lignocelulósicos considerados biomasa residual, provenientes de la actividad forestal y los desechos de la agroindustria, ofrecen la posibilidad de obtener otros productos renovables y de valorizar la cadena productiva. La conversión de material residual en otros productos, se posibilita mediante las transformaciones termoquímicas de la biomasa, dentro de las cuales se deben destacar procesos tales como la torrefacción, pirolisis, hidrotratamiento y gasificación entre otros (Peña *et al.*, 2014). En la actualidad ha

despertado interés el aprovechamiento de fracciones arbóreas no maderables provenientes de la actividad forestal o el manejo de plantaciones y programas forestales, especialmente diseñados para la producción de biomasa. La fracción de biomasa encontrados en los restos de corta suponen algo más del 20 por ciento de la biomasa arbórea (Álvarez *et al.*, 2005).

Para establecer con precisión la cantidad de biomasa que corresponde a cada una de las fracciones de las forestas, se han realizado modelaciones en base a ecuaciones que permitan estimar la biomasa de las diferentes fracciones arbóreas de *Eucalyptus globulus* y que a su vez combinados con los modelos de crecimiento de biomasa han podido determinar los porcentajes de los componentes de las forestas de eucalipto (Álvarez *et al.*, 2005)

La investigación Estimación de la biomasa aérea de eucalipto realizada en Galicia, establece medias para los porcentajes registrados de biomasa de las fracciones a partir del peso con los siguientes resultados: madera 82,3; corteza 7,4; ramas gruesas 5,4; ramas finas 2,1; ramillos 0,9 y hojas 2 por ciento. Indicando que los porcentajes de peso seco de cada una de las fracciones con respecto a la biomasa total arbórea son bastante constantes en todas las parcelas estudiadas. Lo que si muestra significancia, es el incremento del porcentaje de madera al aumentar el diámetro de los pies, al mismo tiempo que disminuyen los porcentajes de corteza y de las fracciones de copa (Álvarez *et al.*, 2005). Estos valores fueron confirmados por el estudio Producción y reciclaje en los sistemas agroforestales : La biomasa forestal primaria (Rigueiro y Dans del Valle, 2007).

El trabajo Doctoral sobre estimación de la biomasa aérea de eucalipto, concluye que la madera de esta especie supone entre el 71 y 76 por ciento del peso seco de la biomasa, seguida de la corteza con un 10-11 por ciento, las ramas con 7-8 por ciento, además de ramillos y hojas con 8-10 por ciento. En este estudio se indica también que normalmente se cumple un orden de acumulación de biomasa que es: madera > corteza > hojas > ramas > ramillos. Refiriendo además que las masas forestales se ven sometidas a diferentes perturbaciones a lo largo del turno, ya sean de tipo natural, como de tipo antrópico que pueden hacer variar los rendimientos en peso de estos componentes (Balboa 2005).

El estudio Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el suroeste de España, reporta que la biomasa aérea, presente en los rodales, tiene una distribución porcentual que oscila entre 54,9 a 61,1 por ciento en fuste, 7,7 a 9,2 por ciento en corteza, 11,8 a 12,8 por ciento en ramas y 17,2 a 25,5 por ciento en hojas. Estos valores son similares a los señalados por otros estudios en *Eucalyptus. globulus*, determinando que el porcentaje

de fuste, corteza, ramas y hojas era de 62; 10; 13 y 15 por ciento, respectivamente (Donoso *et al.*, 1999).

La investigación de Pozas (2012) con el análisis de la biomasa en España, encuentra en términos generales una estimación porcentual de un 88 por ciento de biomasa primaria de masas forestales y un 12 por ciento de biomasa secundaria de residuos agroforestales. La recopilación del libro *El eucalipto en la repoblación forestal* de la FAO, establece que el 80 por ciento del peso representa la madera y el 20 por ciento los demás componentes. La proporción de volumen de corteza, disminuye desde el 25 por ciento a los 5 años, hasta el 7,5 por ciento a los 10 años (FAO, 1981).

Estudios realizados en México, para la composición porcentual de la biomasa, guardan alta similitud con los datos obtenidos en otras regiones geográficas, para la variedad *Eucalyptus globulus*, estimando la cantidad de biomasa aérea para rodales de 12 años en una proporción de: madera 82.6 por ciento; ramas 9.7 por ciento; hojas y demás 7.7 por ciento (Hernández, 2002).

Como referencias adicionales, en América del Sur la investigación *Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de Eucalyptus viminalis*, localizadas en el centro-oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En árboles de 4 a 14 años con alturas entre 7,5 m y 28,4 m, establece una proporción del 62 por ciento para volúmenes de fuste y 38 por ciento para los demás componentes aéreos, indicando al igual que para *Eucalyptus globulus*, que la proporción de biomasa foliar disminuye con la edad y aumenta el porcentaje de madera (Ferrete *et al.*, 2014).

El análisis de la capacidad de captura de carbono en ecosistemas mixtos en el estado de Tamaulipas de México, refiere que la mayor proporción se ubica en el fuste, ramas y hojas 79.6 %, en las raíces se localiza el 11,8%, en la hojarasca se almacena el 7,8 %, mientras que en la necromasa y regeneración se encuentra sólo el 0,4 y 0,5 % respectivamente del carbono total de los tres ecosistemas (Jiménez *et al.*, 2008).

Sobre los volúmenes de biomasa residual a pie de monte para *Eucalyptus globulus*, los resultados para plantaciones en Galicia, obtenidos en el estudio *Aprovechamiento de la biomasa residual y modelos de producción de biomasa forestal*, expuestos en el Quinto Congreso Forestal Español, determinan rendimientos de biomasa residual recogida a pie de monte en eucalipto de 9 a 13.1 t ha⁻¹ de materia verde (Dopazo Amoedo *et al.*, 2009).

El estudio Proyecto básico de una planta de biomasa de *Eucalyptus globulus* en España indica que los restos no maderables (corteza + ramas + hojas), producidos por una plantación de eucalipto pueden oscilar entre 3 y 6 t ha⁻¹ año, como reseña para diferentes zonas de eucaliptos en Australia, Portugal y España (Pozas, 2012).

La investigación realizada en el Distrito Metropolitano de Quito Ecuador, en árboles de *Eucalyptus globulus* de 20 años, con densidades entre 644 a 2379 árboles por hectárea, reporta acumulaciones de biomasa en suelo durante un año con valores entre 893 a 1,455 kg ha⁻¹ para la caída de hojarasca, indicando que coincide con valores que se han documentado en bosques de Queensland para diferentes especies de eucalipto, en donde se han encontrado acumulaciones de 900 a 2.700 kg ha⁻¹ (Suárez y Anchaluisa, 2013).

2.2.4. Efectos ambientales por la quema de biomasa

La combustión es una reacción de oxidación en la que interviene el oxígeno como agente oxidante; pero para que sea propiamente una combustión debe ser rápida y exotérmica, con aumento elevado de la temperatura. La biomasa reacciona con el oxígeno y arde produciendo suficiente energía como para autoalimentarse (vencer la energía de activación de toda reacción química), la reacción cede calor al medio, por lo que es exotérmica, y los productos de la combustión alcanzan altas temperaturas que se ponen incandescentes, mostrándonos el fenómeno de fuego o llama. Cuando se queman completamente compuestos orgánicos, el combustible es oxidado totalmente por el carburante, dando lugar a productos de la combustión (Chiliquinga y Jiménez, 2015).

Tradicionalmente en la serranía andina, los residuos de biomasa de eucalipto han sido desaprovechados y en la mayoría de los casos quemados en el mismo lugar sin ningún control, situación que se ha vuelto muy peligrosa por las características inflamables de la biomasa, que es susceptible de alta combustión a nivel de: hojas, ramas y cortezas; acumuladas en el suelo. Al ser una especie cuya estructura y comportamiento (por ejemplo, rápida acumulación de hojarasca, desprendimiento de cortezas, aceites volátiles), favorece la propagación del fuego, las plantaciones de eucalipto son propensas a experimentar grandes incendios (Suárez y Anchaluisa, 2013).

El eucalipto es una especie altamente inflamable, especialmente cuando está seco y por tanto muy vulnerable a los incendios forestales, sobre todo cuando existe una plantación muy densa. Las quemaduras producen graves daños a nivel superficial y reducen drásticamente

la capa orgánica del suelo (Fernández *et al.*, 2004). Sobre los riesgos de la quema de eucalipto Skolmen y Thomas (1999) manifiestan que las hojas contienen aceites volátiles que producen un fuego de alta temperatura. Sin embargo los árboles rara vez perecen por el fuego ya que rebrotan vigorosamente a partir de los tallos y la base.

El trabajo de Análisis energético por combustión de biomasa leñosa, realizado en Quito Ecuador, establece el poder calórico del eucalipto a partir de un análisis inmediato y proximal realizado a la biomasa y que estableció como resultado un poder calórico superior de 15850 kJ/kg. El análisis de transferencia de calor en los intercambiadores fue realizado aplicando el método DTML (diferencial media logarítmica de temperatura) siendo necesario instalar sensores de temperatura acoplados a una datalogger de 12 canales (Chiliquinga y Jiménez, 2015). Este valor confirma lo referido anteriormente sobre el poder calórico de 16000 kJ/kg para madera de eucalipto, mientras que el carbón vegetal de esta especie tiene 28000 kJ/kg (FAO, 1981).

En la quema de la leña de eucalipto, el exceso de humedad en la materia prima, o el defecto de oxígeno, provoca que la combustión sea incompleta generando carbonilla (carbón) y monóxido de carbono (CO). La materia sólida vegetal tiene un contenido original de agua superior al 50 por ciento en peso, por lo que es importante secarla antes de quemarla para obtener un producto con un contenido en humedad inferior al 15 por ciento. Por otro lado, la biomasa de origen vegetal tiene escaso contenido en azufre no existiendo prácticamente emisiones a la atmósfera en forma de óxidos (Chiliquinga y Jiménez, 2015).

El fuego es un tipo de disturbio que desencadena varios efectos ambientales. Los efectos directos incluyen muerte de la vegetación, consumo de la biomasa y emanación de humo. Los efectos post-fuego incluyen cambios en el microclima, incremento en el rango de la temperatura del suelo y cambios en los nutrientes del suelo así como en la actividad microbiana y alteración del hábitat silvestre de vertebrados e invertebrados. En otras palabras, el fuego puede afectar tanto a la estructura como a la dinámica y funcionalidad de un ecosistema (Suárez y Anchaluisa, 2013). El suelo tiende a alterar sus propiedades físicas, químicas y biológicas y el consecuente incremento de los procesos erosivos por los cambios sufridos en la cubierta vegetal y la estabilidad estructural producida por los agentes cementantes orgánicos e inorgánicos (Campo Velasquez, 2012).

Las quemadas de biomasa no controlada en la superficie, genera condiciones desfavorables para el suelo, por las altas temperaturas alcanzadas, produciendo alteraciones físico

químicas, escorrentía superficial e hidrofobicidad (Arellano y Castillo-Guevara, 2014). La práctica de quemar los residuos forestales sin control, daña otras características del suelo como la absorción de agua. Doerr *et al.* (1996) dicen que la propiedad de hidrofobicidad se considera especialmente importante en entornos afectados por el fuego. Se han documentado alteraciones en el ciclo hidrológico posterior a los incendios forestales debido a la pérdida de la vegetación de la cobertura del suelo y los cambios en las propiedades del suelo, estos efectos pueden derivar en procesos erosivos especialmente bajo condiciones de pendiente y suelos sueltos (Pérez-Cabello *et al.*, 2006).

El aumento de la temperatura del suelo en las plantaciones de eucalipto quemadas, podría aumentar la evaporación del agua del suelo, inhibiendo finalmente la actividad de los descomponedores. Este patrón es especialmente factible si se considera que algunos de los principales descomponedores, como la fauna microbiana y las lombrices de tierra, son muy sensibles a la temperatura, además la falta de lluvia posterior a las quemas, exagera el déficit hídrico en el suelo (Suárez y Anchaluiza, 2013). La duración del calentamiento del suelo afecta significativamente el componente orgánico, niveles superiores a 60 °C en la superficie del suelo durante la combustión, afectan significativamente su biología (Fernández *et al.*, 2004).

Sobre los efectos en la salud humana, el mayor daño se ocasiona por el diámetro aerodinámico del material particulado (PM), que se produce en un incendio forestal con PM menor a 2.5 µm el cual ocasiona contaminación atmosférica e impactos sobre la salud como: bronquitis y obstrucción bronquial crónica; bajo exposición prolongada causa fibrosis pulmonar, además pudiera originar alteraciones a la visibilidad humana (Robertson *et al.*, 2014).

2.3. EL EUCALIPTO

2.3.1. Características generales

El eucalipto es un árbol de la familia *Myrtaceae*, está distribuido en una gran variedad de ecosistemas y es muy común en casi todas las regiones geográficas del planeta, es una planta muy versátil y que ha respondido aceptablemente en casi todas las regiones donde se cultiva (Skolmen y Thomas, 1999). La clasificación botánica se expresa en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Clasificación botánica del *Eucalyptus globulus*

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnolipsida
Subclase	Rosidae
Orden	Myrtales
Familia	Myrtaceae
Género	<i>Eucalyptus</i>
Especie	<i>globulus</i>

La sierra andina está ampliamente poblada por el eucalipto blanco o goma azul, especie originaria de Australia y Tasmania (Moreno *et al.*, 2010) . Fue introducido a la región austral del Ecuador a finales del siglo XIX y se ha integrado plenamente a los ecosistemas andinos, siendo todavía una especie muy desacreditada y relativamente poco estudiada.

Muñoz *et al.* (2008) expresan que las especies de *Eucalyptus* son alrededor de 500 y se originaron principalmente en Australia y en pocos casos en Nueva Zelanda, Tasmania Indonesia y Nueva Guinea. Martínez *et al.* (2006) confirmando lo anterior, pero variando en el número de especies, manifiestan que el eucalipto está compuesto por varias especies forestales, originarias de Australia, presentan una enorme diversidad, con más de 600 especies diferentes.

Las primeras plantas de *Eucalyptus globulus* Labill, llegaron al austro ecuatoriano y a Cuenca específicamente, a finales de la década de 1860 o principios de 1870, por lo que el eucalipto data en el austro desde aproximadamente 150 años, desde cuando se empezaron a propagar y poblar por toda la región austral del Ecuador. En la serranía andina de América del Sur (Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile), se viene utilizando el *Eucalyptus globulus* variedad azul o goma azul, que se ha adaptado a la mayoría de ecosistemas de la región interandina (Iglesias, 2014). El Eucalipto fue introducido en Ecuador en el siglo XIX, cuando la deforestación en el callejón interandino se acercaba a niveles críticos. Este árbol se adaptó al clima y a la altura y fue rápidamente difundido, ganando aceptación por su rápido crecimiento, por lo que sembrar y vender madera de eucalipto para construcción, leña y carbón era un negocio lucrativo. Este fenómeno ocurrió en toda América Latina (Cuvi, 2005).

La madera de eucalipto por sus condiciones de resistencia y durabilidad, es una buena alternativa para solucionar los requerimientos de leña y madera locales y para reemplazar a la fuente maderable proveniente del bosque andino, que cada vez es más escasa y difícil de conseguir y que con su extracción, ocasiona el deterioro ambiental de los delicados ecosistemas nativos. Sobre el uso del eucalipto y debido a sus excelentes condiciones para la producción de pulpa y papel, está referida como una de las especies de mayor demanda en el mercado internacional (Balmelli y Resquin, 2005). La densidad media es de alrededor de 1,075 para la especie *E. globulus* (FAO, 1981). La densidad aparente para troza verdes en rodales de 21 años está entre 1110,0 y 1163,5 kg/m³ (García-Villabrille, 2015).

Existe un debate parcializado y la mayoría de veces, deficientemente fundamentado sobre las ventajas y desventajas de utilizar esta especie, argumentando que su uso perjudica el ecosistema local, ocasionando daños especialmente en el suelo. En la discusión sobre el uso de la especie Huber *et al.* (2010) indican que hay diversas opiniones y fundamentaciones con respecto al verdadero impacto que ocasionan las cubiertas forestales en el régimen hidrológico y en la magnitud de la erosión.

Los criterios forestales y ambientales de la bibliografía consultada, sugieren que especialmente en la serranía andina, existe una falta de manejo técnico de la especie, principalmente en cuanto a la selección de sitios y densidades para la siembra, complementándose con la falta de manejo en cuanto podas y raleos. Es preciso destacar la importancia del secuestro de carbono como servicio ecosistémico de las plantaciones de eucalipto frente a la problemática del calentamiento global, no solo en la biomasa arbórea sino también en los suelos forestales, los cuales se presentan como sumideros más estables (Yaranga y Cano, 2013; Oliva *et al.*, 2017; Salas *et al.*, 2017).

2.3.2. Utilidad de la especie

La variedad *Eucalyptus globulus*, ha sido ampliamente difundida y promocionada, por gobiernos y empresas que han promovido el establecimiento de plantaciones forestales de gran escala con el objetivo de fomentar la industria papelería. Este desarrollo forestal ya se ha dado en otros países como: Brasil, México, España, Portugal, Sudáfrica e India, donde las industrias relacionadas a la actividad forestal constituyen un importante sector de la economía nacional (Ceccon y Martínez-Ramos, 1999).

Balmelli y Resquin (2005) indican que entre las características del *Eucalyptus globulus*, destaca su excelente madera para la producción de pulpa y papel, convirtiéndose en una de las especies de mayor demanda en el mercado internacional. Es actualmente la especie forestal más plantada. Ceccon y Martínez-Ramos (1999) refieren que de su celulosa pueden fabricarse múltiples productos de uso cotidiano como: sanitarios, pañales higiénicos, derivados como el celofán o la cola de empapelar, fórmica y otros laminados, papeles especiales, filtros, papeles electrónicos; así como elaboración de fibras textiles como el rayón.

La especie forestal en América del Sur, constituye un importante aporte al modo de vida de las comunidades rurales ya que es la única fuente de producción de leña y madera para las actividades del campo, evitando la presión constante sobre los pocos relictos de bosque nativo existente (Grattapaglia y Kirst 2008; Braun *et al.*, 2017), además brinda importantes servicios ambientales tanto directos como indirectos, entre los que se puede citar la importancia en la captura y secuestro de carbono (Alegre *et al.*, 2002; Timoteo *et al.*, 2016; Kanninen, 2017).

El eucalipto tiene usos medicinales por las propiedades de sus aceites esenciales como el eucaliptol y su actividad anti bacteriana para afecciones del tracto respiratorio. Se lo utiliza como infusión para enfermedades gripales o directamente con sus hojas para aliviar dolores del cuerpo. (Salari *et al.*, 2006; Moreno *et al.*, 2010). En toda la serranía y actualmente incluso en algunas regiones de litoral se utilizan las hojas tiernas del eucalipto, como insecticida natural para controlar insectos a nivel doméstico, también por su acción de aromatizar los espacios y repeler a las plagas (Yáñez *et al.*, 2010; Ríos *et al.*, 2017).

Hernández *et al.* (2007) refieren que la especie tiene un importante potencial de utilización como componente de aplicación alternativa en el control de enfermedades fungosas de los cultivos agrícolas, que por su condición de ser natural, es una herramienta de intervención ecológica de patógenos. Gonza Carnero *et al.* (2013) confirman lo anterior indicando que las plantas producen compuestos con propiedades antimicrobianas que pueden ser empleadas para controlar diferentes enfermedades en productos hortofrutícolas.

Como un aporte importante ambiental, la composición de las forestas de eucalipto, proporcionan servicios ecosistémicos, siendo significativos actores del secuestro de carbono atmosférico realizado en la biomasa aérea y radicular, lo cual contribuye a reducir la

concentración de CO₂ de la atmósfera, uno de los principales gases de efecto invernadero (Roxburgh *et al.*, 2006; Federici *et al.*, 2015).

La zona de territorio en estudio, ubicada en la parte austral de la serranía ecuatoriana, tiene condiciones agrícolas asociadas con el cultivo del maíz y de utilidad forestal con especies introducidas, principalmente eucalipto, donde también se realizan actividades pecuarias. Noguera y Vélez (2011) indican que los sistemas de producción agropecuarios, se basan principalmente en la explotación indiscriminada de los recursos naturales, a través de la implementación de monocultivos y de ganadería intensiva, ocasionando sobreuso del suelo, y una posterior degradación y abandono de la tierra.

Una de las alternativas para la solución a estos problemas, constituye los sistemas de producción combinados, donde se produce una gestión apropiada de especies como los sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles, que mejoran la fertilidad del suelo conforme aumenta la edad de los árboles, pudiendo reutilizar su biomasa. Daniel y Couto (1999) expresan que el eucalipto es una especie adaptada para las prácticas silvopastoriles, porque tiene copas estrechas que permiten la penetración de una cantidad razonable de luz directa o difusa hasta el nivel del suelo permitiendo el crecimiento de plantas forrajeras.

2.3.3. Ecosistema del eucalipto

La especie forestal tiene un amplio margen adaptativo Skolmen y Thomas (1999) refieren que el eucalipto goma azul, posee una gran adaptabilidad climática, las introducciones más exitosas a nivel mundial han ocurrido en lugares con un clima templado y moderado o en altas elevaciones con temperaturas frías en las áreas tropicales. Sobre este aspecto Mendham *et al.* (2004) expresan que estas plantaciones permiten a los agricultores diversificar sus fuentes de ingresos mientras que confieren otras ventajas, entre ellas reducir la sobresaturación de los suelos agrícolas y compensar la exigencia de proporcionar los productos de madera de bosques nativos. Burneo y Gunkel (2003) en su estudio sobre los cultivos de la serranía de Otavalo en el norte del Ecuador, destacan que coexisten asociaciones forestales y de pastos desde hace mucho tiempo y expresan que existen tierras de pastoreo en zonas bajas con los bosques de *Eucalyptus globulus* en pendientes.

Como una alternativa inmediata al efecto de acidez producido por la biomasa residual del eucalipto, los agricultores tradicionalmente incineran las ramas, cortezas y hojarasca para producir cenizas que neutralicen este efecto. Vergara-Sánchez y Etchevers-Barra (2006)

indican que la acidez en la mayoría de los sistemas boscosos es parcialmente neutralizada por los óxidos de los metales básicos generados al quemar la vegetación.

La importancia en el equilibrio nutricional de los agroecosistemas con especies forestales, se da en la capacidad de que los nutrientes contenidos en la biomasa puedan ser reinsertados al suelo, para propiciar el crecimiento de otros cultivos. Martínez *et al.* (2006) indican que existen estudios que demuestran que alrededor de 70 por ciento de los nutrimentos extraídos por los árboles se acumula en las hojas, ramas y cortezas.

Se debe tener en cuenta también el riesgo que la hojarasca sin tratar puede generar el ingreso de plagas y enfermedades al bosque. Mathers *et al.* (2003) manifiestan que las termitas se alimentan de estructuras maderables, árboles deciduos, plantas leñosas, cartón y papel. El daño que ocasionan se debe principalmente a que su dieta alimenticia se basa en lignina y celulosa. Diversos autores enfatizan que es fundamental contar con mejores prácticas de gestión de los residuos de las plantas, para mantener el suelo a largo plazo con las tasas de suministro de nutrientes y la productividad de plantaciones de eucaliptos (Aggangan *et al.*, 1998).

Como en cualquier otro cultivo, con el eucalipto es necesario realizar un manejo integrado de la especie que incluya espaciamientos acorde al desarrollo posterior de la planta y que permitan el crecimiento de otros cultivos con podas y raleos, pudiendo establecerse en una región sin causar problemas o en caso contrario, determinar cuál es el esquema de manejo forestal que minimice los efectos de la plantación sobre otras especies de plantas (Espinoza García, 1996; Daniel y Couto, 1999).

Muchos autores destacan el uso del eucalipto combinado con otras especies, refiriendo que con la gestión apropiada del potencial de la agroforestería para las fincas, es posible una planificación de intervenciones que permitan mayores beneficios como los obtenidos con los cercos vivos, las barreras contra el viento, con la sombra, la conservación de la tierra y del agua, la producción de madera y leña, la protección de los animales durante tiempos malos (Daniel y Couto, 1999).

2.3.4. Efectos alelopáticos del eucalipto

El uso intensivo de esta especie, principalmente en condiciones de mala elección del sitio de siembra, densidad y falta de manejo forestal; generan conflictos asociados al ecosistema. Diversos estudios señalan alteraciones a nivel de suelo, principalmente en cuanto a

extracción de macronutrientes (N-P-K), cambio del pH (potencial hidrógeno) del suelo, materia orgánica y profundidad; propiedades muy ligadas a la fertilidad del suelo forestal, con la conclusión de que los estratos, bajo plantaciones de eucalipto, se han vuelto más ácidos y deficientes en nutrientes (Chacon *et al.*, 2003; Delgado *et al.*, 2006; Huber *et al.*, 2010).

Aggangan *et al.* (1998) refieren que en eucaliptos la hojarasca se descompone lentamente dando lugar a la inmovilización y almacenamiento de una gran cantidad de nutrientes. Al respecto Mendham *et al.* (2004) en su trabajo sobre los cambios en el carbono del suelo después del desbroce o forestación en el suroeste de Australia, aseveran que las plantaciones provocaron un aumento de nitrógeno (N) por la materia orgánica, pero con la inmovilización del mismo y una disminución en la disponibilidad del elemento.

En la investigación que estudió los factores que inciden en el rendimiento del *Eucalyptus globulus* L. en la zona de estudio en el Ecuador, se demostró la alteración que existe para el caso del potencial hidrógeno (pH), determinando que las plantaciones de eucalipto acidifican los suelos, comprobando que existen niveles más ácidos hacia el interior del bosque que al exterior (Iglesias, 2014).

La alelopatía de la especie se presenta principalmente en condiciones de bosque denso, el eucalipto puede ser asociado con la producción de zonas de inhibición alrededor o bajo los árboles donde la vegetación es menos diversa, menos vigorosa y/o menos densa que las zonas lejanas. La cercanía de eucaliptos a algunos cultivos puede producir bajos rendimientos y crecimiento pobre en las plantas cultivadas (Espinoza García, 1996).

Muchos investigadores han demostrado que los principales aleloquímicos en *Eucalyptus globulus*, son los glucósidos fenólicos que generan daño internucleosomal en las plantas colindantes, produciendo alteraciones del ADN. Las interacciones de los aleloquímicos incluyen efectos genéticos variables en la planta. La alta acumulación de hojas de eucalipto, en la superficie del suelo, puede ser responsable del retraso del crecimiento de las plantas del sotobosque (Abdelmigid y Morsi, 2017).

2.3.5. El Eucalipto en el austro del Ecuador

La recopilación sobre el eucalipto en la repoblación forestal de la FAO, indica que la especie *Eucalyptus globulus* fue vastamente plantada sobre la meseta central de la cordillera de los

Andes del Ecuador entre las alturas de 1800 y 3300 ms.n.m. El mejor crecimiento se presenta en localidades entre 2000 y 2900 ms.n.m. donde la precipitación anual es de 1000 a 2000 mm. La zona corresponde, en la designación agroecológica de Holdridge, como bosque húmedo montano bajo. La principal concentración de plantaciones se encuentra entre Quito y Latacunga, pero las plantaciones se extienden a las provincias de Azuay, Bolívar, Cañar, Carchi, Cotopaxi, Chimborazo, Imbabura, Loja, Pichincha y Tungurahua (FAO 1981).

Las condiciones genéticas del eucalipto para adaptarse a las circunstancias de suelos andinos, además del rendimiento en madera y subproductos, junto con su resistencia y especialmente por su rápido crecimiento; lo ubican como una de las especies con mayor potencial de utilización ambiental y dasonómico en las regiones de sierra alta andina, por lo cual es preciso crear las mejores condiciones para la gestión forestal de esta especie, procurando el menor impacto sobre los recursos naturales (Iglesias, 2014).

Los bosques de eucalipto en su mayoría se implantan en regiones de la sierra austral del Ecuador sin llegar a ocupar grandes espacios, pues en su mayoría no han sido plantados como explotación forestal, sino más bien con fines de protección, como barreras rompe vientos. En el estudio de cobertura y uso del suelo de la provincia del Azuay, reporta una superficie de 12523,9 hectáreas de eucalipto y 612,4 hectáreas de plantaciones de asociaciones de pino y eucalipto (Tenesaca *et al.*, 2017).

2.4. EL MAÍZ

2.4.1. Características generales

El maíz es una planta monocotiledónea muy usada en todas las regiones del planeta ya sea para uso humano o como alimento de animales. El maíz especialmente de la variedad blanco (*Zea mays* L.), es un cultivo tradicional de la serranía andina, se lo cultiva desde épocas prehispánicas, conocido con el nombre de *sara o kuri sara* (Piperno, 2003; Guillen *et al.*, 2014; Vargas, 2014). La clasificación botánica se detalla en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Clasificación botánica del *Zea mays*

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	<i>Zea</i>
Especie	<i>mays</i>

El maíz es un alimento ampliamente difundido gracias a la plasticidad de sus características naturales y la posibilidad de ser consumido de distintas maneras. Es originario de Mesoamérica. Vargas (2014) indica que a partir de datos arqueológicos y de biología molecular, algunos autores proponen que su domesticación parece haber ocurrido en algún lugar de Guatemala o del sur de México hacia 8700 años.

Confirmando lo anterior Piperno (2003) refiere que los cultivos de maíz sembrados por la agricultura de secano en los valles mexicanos de Tehuacan y Oaxaca, por la bondad de su clima, tienen entre 7000 y 8000 años. Este mismo autor en su trabajo para el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, dice que en Valdivia sitio de La Emerenciana en el Ecuador, se presentan los primeros restos de maíz. Por lo tanto hay al menos 4000 años de introducción de maíz en América del sur.

En la actualidad es uno de los cereales más cultivados en el mundo, que no solo se producen principalmente para forrajes y granos para la alimentación animal, sino también como productos derivados para el consumo humano. Actualmente se estudian las propiedades medicinales como inhibidor de ciertas afecciones cancerígenas. Sobre la importancia para la alimentación de las poblaciones de la sierra, la variedad *Zea mays* L, es un importante cultivo alimentario (Jayaram *et al.*, 2015; Longchamp *et al.*, 2015).

Es un producto fundamental para la nutrición de países principalmente en vías de desarrollo incluso se ha maniobrado genéticamente para mejorar sus características. Al respecto Vidal *et al.* (2015) dicen que los cultivos de maíz *Zea mays* a nivel mundial representan la segunda mayor área cultivada detrás de la soja en todo el planeta. También se citan algunas deficiencias en cuanto a sus propiedades alimenticias. Wang *et al.* (2008) expresan que el maíz es un alimento importante para la alimentación animal pero es un vegetal con bajo

contenido proteico. Por esta razón los centros de investigación especializados en maíz, buscan variedades con un mejor contenido de proteínas.

2.4.2. Utilidad de la gramínea

En la zona austral del Ecuador, al igual que en la mayor parte de la sierra de los andes, el maíz juega un rol protagónico en la cultura y tradiciones locales, debido a que es parte fundamental de ritos y celebraciones, se lo consume en tierno como choclo y maduro, sus granos cocidos son llamados mote, de igual manera se procesan para realizar diferentes cocidos como tortillas y tamales, además de bebidas típicas como la chicha.

Al respecto Pearsall *et al.* (2004) comentan que en el antiguo Ecuador, el maíz fue el alimento más común en los hogares y que contribuyó fundamentalmente en la dieta. Sostienen también que el maíz es muy productivo, fácil de almacenar con un mínimo de procesamiento y rico en hidratos de carbono. El maíz es uno de los pilares de la vida en muchas partes de las Américas y el mundo. La planta de maíz también se la utiliza como alimento para el ganado y actualmente con el crecimiento de la actividad pecuaria con vacunos de leche, es muy requerido como planta forrajera.

Otro valor adicional a la riqueza cultural andina consiste en que el maíz mantuvo y mantiene una presencia ceremonial, como es reunir a las personas en el trabajo de las labores culturales y compartir las cosechas, en lugar de únicamente una función económica, aspecto primordial para la mayoría de la cosmovisión andina (Staller, 2003). Al respecto Zuluaga Sánchez (2011) relaciona que la tierra y sus tradiciones de siembra y cosecha, no sólo son un bien productivo, en muchas culturas tiene un gran valor simbólico asociado a la vida, a la identidad y a la herencia cultural, así como al poder y a la toma de decisiones.

2.4.3. El cultivo del maíz

El cultivo de maíz en la zona austral del Ecuador, se produce mayormente en condiciones de agricultura familiar, debido a la topografía del terreno y por el minifundio imperante. El ciclo de cultivo va de octubre a junio, coincidiendo con la estación de lluvias en la región ya que hay deficiencia en cuanto a riego artificial. Las variedades más sembradas son el maíz blanco y también se cultiva junto a otras plantas como el fréjol *Phaseolus vulgaris*, de la misma manera se asocia a la actividad pecuaria. Sobre la combinación de este cultivo. Niemann *et al.* (2013) refieren que los indígenas Saraguros de Loja-Ecuador, incorporan

ganadería al cultivo del maíz, para complementar su tradicional de cultivo mixto. Para el análisis del cultivo asociado con la actividad pecuaria, se puntualizan beneficios que se obtienen con la distribución de estiércol de la actividad de ganado y aves de corral y con el uso de leguminosas forrajeras fijadoras de nitrógeno, que pueden mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo (Daniel y Couto, 1999).

El uso intensivo y la falta de fertilización en los cultivos, ocasiona bajos rendimientos para una agricultura de subsistencia. Se ha encontrado reportes de alteración al pH del suelo por el uso del cultivo de maíz y acumulación de metales pesados como arsénico. Neidhardt *et al.* (2015) informan que las raíces de *Zea mays* pueden causar un importante acidificación en el suelo cerca de la zona de alargamiento, que probablemente afecta la movilidad de metales traza. El deterioro del suelo producido por prácticas tradicionales de cultivo sin innovaciones tecnológicas, como es el caso del maíz, que se viene sembrando año a año manteniendo la misma tecnología y sin una adecuada gestión, siendo una realidad similar en varios países de la región andina (Kanninen 2003; Oliva *et al.*, 2017).

En el austro ecuatoriano el maíz junto con el arroz, son los cereales más importantes de la dieta alimenticia de la región, suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales por lo que se ha mantenido como un monocultivo muy explotado y arraigado en la cultura gastronómica local, situación que lleva a buscar estrategias de aumento de la producción expresadas en mayores niveles de rendimiento que optimicen el uso de recursos amigables con el ambiente y que sean de fácil aplicación local (Vera *et al.*, 2013; Njuguna *et al.*, 2015).

Como una alternativa sustentable es necesario que las prácticas agrícolas, especialmente con cultivos andinos como el maíz, se encaminen a conservar el agua, el aire, el suelo, los recursos bióticos vegetales y animales; no degradar el ambiente y ser económicamente viables y socialmente aceptables (Vergara-Sánchez y Etchevers-Barra, 2006).

La cobertura del suelo con el cultivo de maíz en la región, está determinada en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia del Azuay (2015-2030), que refiere una superficie cultivada de maíz de 7311,15 hectáreas, superficie que corresponde al 30 por ciento de los cultivos agrícolas anuales de la provincia (Gobierno Provincial del Azuay, 2015).

2.4.4. Descripción de la variedad “*Mishqui Sara 103*”

Generalidades

La fuente oficial del Centro de Investigaciones de la Estación Experimental del Austro INIAP (2010) informa que el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP) introdujo al país la variedad de maíz de grano blanco harinoso con alta calidad de proteína (ACP) *Aychazara 102*, procedente del Centro de Fitoecogenética Pairumani de Bolivia en el año 2006. En el año 2006 se realizó un ciclo de selección masal, durante el 2007 y 2008 se evaluó el material, mediante selección familiar por medios hermanos, en la Estación Experimental del Austro; la semilla de machos sirvió para evaluar el material en campos de agricultores en las Provincias de Guayas, Cañar, Azuay y Loja, durante los años 2007, 2008 y 2009. Las familias se seleccionaron, por sanidad, buena cobertura de mazorca y rendimientos entre 4 a 6 t ha⁻¹, las mismas que sirvieron de base para la formación de un pool e incremento de semilla genética en el año 2009 y 2010.

Para el 2010 en las Provincias de Cañar, Azuay y Loja se siembran, 38261 ha de maíz suave, con rendimientos de 0,6 a 1,5 t ha⁻¹ (INEC 2008); éstos bajos rendimientos se deben al uso de semillas de baja calidad, y la ninguna tecnología que aplican los productores al cultivo. De las 38261 ha, 23169 son para consumo en seco y cocido (mote) y 15092 ha son para consumo en tierno (choclo).

La variedad INIAP-103 “*Mishqui Sara*” (maíz nutritivo) constituye una alternativa para mejorar la productividad y los ingresos de los pequeños productores del sur del Ecuador. Ésta variedad es más nutritiva que el maíz común debido a que posee mayor cantidad de aminoácidos como triptófano y lisina y es más precoz que los maíces que siembra el agricultor.

La variedad no pretendió reemplazar a las variedades nativas, por el contrario se presentó como una alternativa productiva y rentable para los sistemas de producción de la región, así los agricultores pueden cultivar para su consumo y venta en choclo, propiciando la seguridad y soberanía alimentaria de la población.

El trabajo de mejoramiento genético se realizó en la Granja de Chuquipata (Cañar) y en la Estación Experimental del Austro, Bullcay, Gualaceo en la provincia del Azuay, ya que disponen de condiciones favorables para el desarrollo del cultivo y existió un mayor control para los trabajos de mejoramiento.

Las evaluaciones del comportamiento de la variedad INIAP-103 se realizó en campos de productores en las provincias de Guayas, Cañar, Azuay y Loja, debido a que ésta nueva variedad podría convertirse en una alternativa de producción para su venta en estado tierno (choclo). Además en los valles cálidos la mayor parte de productores siembran maíces amarillos duros, los mismos que no ofrecen las cualidades culinarias para su consumo en choclo.

La variedad INIAP-103 “*Mishqui Sara*” se evaluó durante los años 2006, 2007, 2008 y 2009 en zonas de las provincias de Guayas: Estación Experimental Litoral Sur, Bucay; Cañar: Chuquipata; Azuay: Oña, Santa Isabel, Gualaceo, Sigsig y Girón; En Loja: Saraguro (Tablón), Malacatos, Pindal, Celica y Zapotillo (El Almendral). La fecha oficial de obtención de la variedad fue el 18 de marzo del 2010.

Cuadro 3: Características morfológicas de la variedad

CARACTERÍSTICAS *	RANGO	PROMEDIO
Altura de Planta (m)	2,20-2,80	2,50
Altura de Mazorca (m)	1,10-1,40	1,25
Floración femenina (días)	60-80	70
Ciclo Vegetativo (días)		
Tierno (choclo)	100-120	110
Seco	150-180	165
Porcentaje de desgrane	70-80	75
Rendimiento Experimental en grano seco (t ha ⁻¹)	3,5-5,5	4,5
Rendimiento comercial de choclos (sacos ha ⁻¹)**	300-400	350

FUENTE: (INIAP, 2010)

* Datos promedio de localidades entre 40-2650 ms.n.m.

** Sacos de 120 choclos de primera y 150 de segunda clase.

Cuadro 4: Características agronómicas

CARACTERÍSTICAS *	PROMEDIO
Pubescencia del tallo: (% de plantas)	
Escasa	70,0
Media	30,0
Abundante	0,0
Número de hojas sobre la mazorca superior	6
Color de estigmas: (% de plantas)	
Púrpura oscuro	0,0
Púrpura claro	20,0
Crema	80,0
Tipo de panoja: (% de plantas)	
Primaria	0,0
Secundaria	80,0
Terciaria	20,0
Color de panoja: (% de plantas)	
Púrpura oscuro	0,0
Púrpura claro	40,0
Crema	60,0
Longitud de mazorca (cm)	20,2
Diámetro de mazorca (cm)	8,0
Número de hileras	14
Color de tusa: (% de mazorcas)	
Roja	0,0
Blanca	100,0
Rosada	0,0
Peso de 1000 semillas (g)	557
Tamaño de grano (mm)	16,0
Tipo de grano	Harinoso
Color de grano	Blanco

FUENTE: (INIAP, 2010)

* Datos obtenidos en la Estación Experimental del Austro 2230 ms.n.m.

Cuadro 5: Características de calidad*

Rubro	Porcentaje (%)		
	INIAP-103	Blanco Comercial	Opaco-504
Humedad		10,43	
Cenizas		1,78	
Proteína		8,30	
Fibra		3,07	
Extracto Etéreo		5,41	
Aminoácidos:			
Triptófano	0,06	0,04	0,05
Lisina	0,33	0,20	0,34

FUENTE: (INIAP, 2010)

* Departamento Nacional de Nutrición y Calidad de la EESC-INIAP- DNC

Cuadro 6: Comparación de materiales en choclo

MATERIAL	LOCALIDAD	AÑO	CHOCLOS PRIMERA* %	SABOR
INIAP-103	Azuay-Bullcay	2009	85	Muy dulce-Excelente
Zhima del Agricultor	Azuay-Bullcay	2009	50	Dulce-Muy Bueno
INIAP-103	Loja-Sumaipamba	2009	78	Muy dulce-Excelente
Testigo Blanco	Loja-Sumaipamba	2009	72	Dulce-Bueno

FUENTE: (INIAP, 2010)

*Mayor a 20,1 cm. Norma INEN 1761.1900-09.

Adaptación y rendimiento

La variedad posee un amplio rango de adaptación, pudiendo sembrarse desde los 40 (Guayas-Estación Experimental Litoral Sur) a 2650 ms.n.m. (Azuay-Sigsig); sin embargo los mejores resultados para cosecha en choclo se han conseguido en altitudes comprendidas entre los 1700 a 2650 ms.n.m. en seco se ha obtenido buenos resultados en altitudes comprendidas entre los 850 a 2230 ms.n.m.

Cuadro 7: Rendimiento ajustado al 13% de humedad en varias localidades

PROVINCIA	LOCALIDAD	AÑO	ALTITUD ms.n.m	RENDIMIENTO kg/ha
Azuay	Bullcay	2007	2230	6710,50
Azuay	Bullcay	2008	2230	5733,33
Azuay	Bullcay	2009	2230	7483,06
Azuay	Sta. Isabel- Lunduma	2009	1700	8435,00
Loja	El Almendral	2009	1100	6774,50
Loja	El Naranjo	2009	900	8899,20
Loja	Sumaipamba	2009	850	6577,20
MEDIA				7230,40

FUENTE: (INIAP, 2010)

Se realizó una evaluación para comparar el rendimiento de grano ajustado al 13% de humedad de la variedad I-103 “*Misqui Sara*” frente a testigos locales, al no disponer de materiales blancos harinosos, se evaluaron genotipos de grano blanco duro y semiduro. A pesar que en dos localidades no hubo diferencias significativas en rendimiento, en la evaluación participativa en grano tierno (choclo), en las tres localidades los productores/as prefirieron la variedad I-103 “*Misqui Sara*” por su sabor dulce y tamaño de grano.

Cuadro 8: Rendimiento t ha⁻¹ ajustado al 13% de humedad de 3 variedades y un híbrido experimental en 3 localidades

MATERIAL	TEXTURA	LOCALIDADES			CAIDAD DEL CHOCLO
		Almendral	San Juan	Sabanilla	
HEZCA 3056	Blanco duro	13,4 a	3,4 a	8,0 a	Bueno
I-528	Blanco duro	8,93 b	4,4 a	7,2 ab	Bueno
Testigo	Blanco semiduro	8,92 b	4,0 a	6,1 ab	Muy Bueno
I-103	Blanco harinoso	7,36 b	3,1 a	5,0 b	Excelente

FUENTE: (INIAP, 2010)

* Rangos con la misma letra no son diferentes estadísticamente

Zonificación

La variedad INIAP- 103 tiene un amplio rango de adaptación; se ha sembrado en zonas como Guayas, E.E. Litoral Sur a 40 ms.n.m. hasta los 2650 ms.n.m. en Sigsig-Azuay, con temperaturas que varían entre los 20 y 14°C, con precipitaciones entre los 600 a 1000 mm. Sin embargo el porcentaje de choclos de primera, segunda y tercera clase varían según la altitud. En los valles cálidos, la mayor parte de productores siembran maíces amarillos duros para alimentación de animales menores. Por los resultados obtenidos en localidades comprendidas entre 1700 a 2650 ms.n.m. con la variedad I-103, ésta constituye una nueva alternativa de ingreso por su venta en choclo, logrando mejores precios en el mercado por tamaño y su sabor dulce.

2.4.5. Manejo agronómico del cultivo

La guía de manejo INIAP (2010), establece las siguientes directrices para el manejo agronómico del cultivo de maíz variedad *Mishqui Sara*:

Preparación del suelo

La preparación del suelo se realiza con un mes de anticipación para facilitar la descomposición de residuos, el mismo que se consigue con un pase de arado, uno de rastra y surcada. En zonas donde se siembra con labranza cero, como en los cantones del sur occidente de Loja, debe rozarse el terreno para luego de las primeras lluvias aplicar herbicida y proceder a la siembra.

Fertilización

Es necesario realizar un análisis de suelo previo a la siembra para saber la cantidad de nutrientes requeridos por el cultivo, en caso de no disponer del análisis de suelos se consiguen buenos rendimientos con la aplicación de cuatro sacos de 45 kg de 10-30-10 a la siembra, más dos sacos de urea a los treinta días y dos a los sesenta días después de la siembra (antes de la floración masculina), el suelo debe estar húmedo para su fácil absorción.

En siembras bajo labranza cero, el 10-30-10 se debe aplicar a la siembra en otro hoyo enterrando el fertilizante, o a los 12 días de la siembra (enterrando el fertilizante con el espeque) y la urea se aplicará alrededor de la planta o a chorro continuo, siempre en suelo húmedo.

Época de siembra

En la zona austral en zonas sobre los 2200 ms.n.m. la siembra se inicia con el período de lluvias, desde septiembre a diciembre, en valles cálidos desde los 500 a 1800 ms.n.m. las siembras se inician desde enero a marzo que coincide con la época lluviosa; en zonas bajo riego se puede sembrar todo el año. Existen valles en las provincias de Azuay y Loja que cuentan con sistemas de riego, éstos son ideales para la siembra de la variedad INIAP-103, ya que la humedad relativa es baja (inferior al 50 por ciento) y los productores pueden cosechar la variedad para vender en choclo y la planta como forraje. Además, esta época es óptima para la producción de semilla de calidad, porque existe baja pudrición de grano.

Semilla

El maíz es una planta alógama, su polinización es anemófila (viento) y siempre se cruzará con otros maíces, perdiendo así su pureza genética y proteica, por lo tanto debe proveerse de semilla certificada para cada siembra. En caso de producir su propia semilla (seleccionada), deberá separarse el lote de multiplicación por lo menos 500 m de otros cultivos de maíz, o también sembrar adelantado para evitar cruzamientos, por ello es muy importante conocer los días que transcurren desde la siembra hasta la floración masculina (cuando el 50 por ciento de las plantas liberen el polen) y la floración femenina (cuando el 50 por ciento de las plantas presentan estigmas (pelos de choclo)).

Sistema y densidades de siembra

El maíz en unicultivo se siembra a 0,80 m entre surcos y 0,25 m entre plantas, depositando una semilla por sitio (50000 plantas/ha). En cultivo asociado con fréjol la distancia entre surcos es de 0,80 m y 0,50 m entre plantas depositando dos semillas de maíz y dos de fréjol, la cantidad de semilla requerida en unicultivo es 30 kg/ha y en cultivo asociado se necesitan 30 kg/ha de maíz y 45 kg/ha de fréjol.

Manejo de agua de riego

La mayor parte de productores siembran el maíz bajo condiciones de temporal, es decir cuando se inicia el período de lluvias tanto en la sierra como en los valles cálidos. Cuando se dispone de canales de riego es recomendable regar por aspersion o por goteo para que el uso del agua sea más eficiente. El riego por inundación (que lo practica la mayoría de productores) produce gran cantidad de erosión del suelo. No debe faltar agua al cultivo para que pueda obtenerse buenos rendimientos; pero la época más crítica del cultivo en la cual no debe faltar la suficiente humedad, es dos semanas antes y dos semanas después de la

floración, así se consigue un buen llenado de grano; el cultivo no debe llegar nunca al punto de marchitez permanente, porque la productividad bajará notablemente.

Deshierbas

Para el maíz sembrado en monocultivo en zonas con alta presencia de malezas, se recomienda la aplicación de herbicidas selectivos a base de Atrazina en dosis de 1,6 a 2,0 kg/ha de ingrediente activo (2,0 a 2,5 kg/ha de producto comercial), en 400 litros de agua, la aplicación se realiza en preemergencia, después de la siembra o en post emergencia temprana (malezas con cuatro hojas).

En cultivos bajo labranza reducida, después de las primeras lluvias se debe aplicar productos a base de Glifosato en dosis de 2-3 L/ha, de acuerdo a la incidencia de malezas, inmediatamente después de la siembra.

Cuando el cultivo se asocia con fréjol se recomienda aplicar la mezcla de Linurón en dosis de 0,5 kg de ingrediente activo (1 kg de producto comercial) más Alaclor en dosis de 0,96 L de ingrediente activo (2,0 L de producto comercial) por hectárea en 400 litros de agua. Los herbicidas deben aplicarse en preemergencia sobre suelo húmedo.

Cuando no se usa herbicidas, el cultivo debe permanecer libre de malezas, sobre todo en los primeros estados de desarrollo, lo que se consigue con dos deshierbas manuales.

Plagas comunes y su combate

En zonas donde hay presencia de insectos-plaga en el suelo, es necesario desinfestar la semilla con productos a base Thiodicarb en dosis de 20 cm³/kg de semilla. Cuando hay ataque de insectos trozadores (*Agrotis sp*) (10 por ciento de la población de plantas afectadas) se puede aplicar a la base del tallo insecticidas a base de Acefato en dosis de 0,4 a 0,5 kg/ha de producto comercial, en 200 litros de agua.

Cuando existe ataque de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), se puede controlar con productos de origen vegetal como el Neem X en dosis de 0,5 a 1 L/ha, si el ataque es severo se puede controlar con productos a base de Clorpirifos en dosis de 0,75 L/ha en 200 litros de agua.

En lugares donde se presenta mosca y mariposa del choclo (*Euxesta eluta* y *Helicoverpa sp*), se puede prevenir el daño colocando dos gotas de aceite comestible de origen vegetal (usando una piceta o aceitero) cuando los estigmas tengan tres centímetros de longitud, se puede

repetir la aplicación a los 8 y 15 días, la cantidad de aceite recomendada para cada aplicación será de 3 L/ha.

Para el control de insectos plaga es preferible el uso de productos de franja verde, el uso de insecticidas tóxicos es peligroso para la salud y el medio ambiente, siendo el control químico la última alternativa a ser empleado.

Combate de enfermedades

En la sierra sur no se realiza controles para enfermedades del maíz; sin embargo cuando la humedad relativa es alta puede presentarse Tizón Foliar causado por *Helminthosporium turcicum*, (pasada la floración) el mismo que puede causar un daño económico de consideración

Cosecha

Cuando el cultivo se destina para choclo, la cosecha se realiza en estado “lechoso”, en el campo se puede reconocer este estado cuando los estigmas están de color oscuro y la punta de la mazorca se dobla con el dedo con facilidad. Como el choclo es muy apetecido por los pájaros se puede proteger los mismos con malla plástica de empaque o protectores de papel (cucuruchos). Para semilla se cosechará cuando ha pasado la madurez fisiológica, en campo se puede observar una capa negra en la base del grano y para grano comercial se dejará pasar unos 20 días más en el campo.

Poscosecha

El grano se debe almacenar con una humedad inferior al 13 por ciento, en lugares frescos a 10-12°C, secos y con una humedad relativa inferior al 60 por ciento, libre de roedores e insectos. En silos cerrados se puede usar pastillas de Fosfamina de 3 a 6 pastillas de 3 g por tonelada de semilla, siguiendo las instrucciones necesarias, por ser un producto altamente tóxico.

Industrialización

El principal uso de la variedad INIAP-103 es para consumo en tierno (choclo). Por su pericarpio blando (cáscara) se la puede usar en harinas (coladas, sopas), mote, tortillas, tamales, humitas, bisquets y pancakes. Para la elaboración de pan (nivel de sustitución máximo 15 por ciento), en galletería (nivel de sustitución máximo de 5 por ciento), para la elaboración de biscochos (nivel de sustitución máximo de 50 por ciento). Rendimiento harinero 54 por ciento de harina de primera clase. (Información proporcionada por el

Departamento Nacional de Nutrición y calidad de la Estación Experimental Santa Catalina- INIAP).

Sistemas de cultivo

En zonas sobre los 2000 ms.n.m. el maíz se asocia con fréjol y otros cultivos como cucurbitáceas, haba y arveja; la cebada, trigo o avena se usan para separar los canteros de siembra y se usa para la alimentación de animales menores. La variedad INIAP-103 puede incluirse en este sistema de producción, para consumo o venta en choclo, o se puede dejar hasta la cosecha para grano seco. En los valles cálidos se siembra el maíz con frejol arbustivo, se debe sembrar primero el fréjol y después de 10 a 15 días la variedad INIAP-103, para consumo o venta en choclo o para grano seco.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El trabajo de campo se realizó en la zona austral de la región andina en la república del Ecuador, en un rango altitudinal de 2230 a 2650 ms.n.m. y según la distribución política del país, el área de investigación corresponde a las ciudades de: Cuenca y Gualaceo, pertenecientes a la provincia del Azuay. La validación con el cultivo de maíz se emplazó en la granja de la Estación Experimental del Austro, del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP), localizada en la zona de Bullcay.

Hidrográficamente la región, corresponde a la cuenca hidrográfica del río Paute, afluente del sistema hídrico río Santiago, Marañón, Amazonas, en la vertiente oriental de los Andes. El clima de la zona es templado seco, su temperatura media es de 18°C, el área de estudio se encuentra en los valles de las subcuencas medias, a la salida de la hoya del Paute.

La validación en campo con el cultivo del maíz se realizó en la localización geográfica mostrada en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Coordenadas de ubicación del cultivo

WAY POINT	LATITUD SUR (S)	LONGITUD OESTE (W)
WP 1	2° 51' 905''	78° 46' 616''
WP 2	2° 51' 912''	78° 46' 612''
WP 3	2° 51' 905''	78° 46' 599''
WP 4	2° 51' 898''	78° 46' 604''

FUENTE: INIAP, 2017

El área de Bullcay, está bañada por el río Paute, a su centro cantonal Gualaceo se le denomina el “Jardín Azuayo”. Tiene una población de 38,587 habitantes, en el 2014 según el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador). Fue declarada como Patrimonio Cultural de la Nación, por el Ministerio de Educación y Cultura del Ecuador.

Los cantones y sus parroquias, forman parte del principal eje urbano austral del país en el surco interandino. La zona del cultivo se localiza a 25 Km de la ciudad de Cuenca, la ubicación y las distancias a los principales centros poblados, se muestra en la Figura 2.

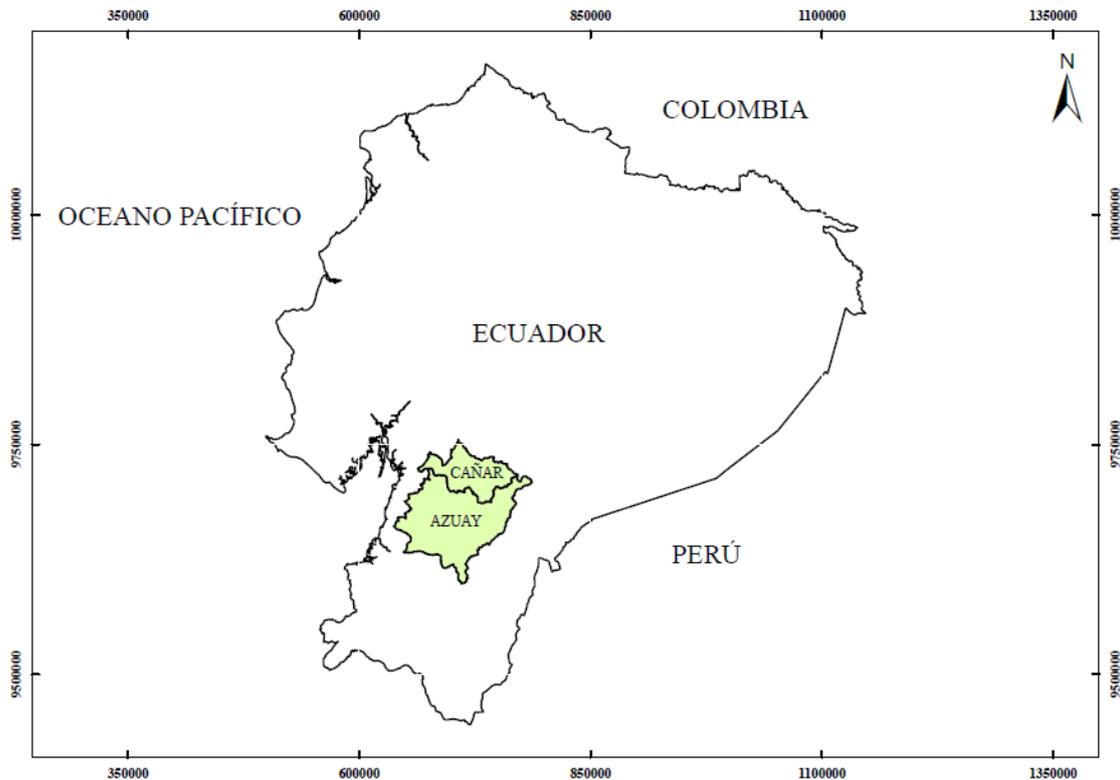


Figura 2: Ubicación de la zona de estudio

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población del estudio, para la etapa de prueba del biochar en el campo, constituyeron las 32 parcelas de maíz, separadas por columnas de repeticiones espaciadas por caminos alternados a dos y un metro (para facilitar el acame de las plantas en la cosecha) y sembradas a distancias de 0,80 m entre surcos y 0,20 m entre plantas, con dos semillas por golpe para en posterior raleo dejar una planta, dando un total de 56 matas por parcela. La población total del estudio fueron 1792 plantas.

3.2.2. Muestra

La muestra evaluada en cada unidad de estudio en la parcela efectiva fue:

- (a) Para la cosecha en choclo y evaluaciones en biomasa, se tomaron cuatro plantas de cada parcela, descartando las plantas de los extremos, que podrían estar influenciadas por factores externos.
- (b) Para la cosecha en mazorca, se evaluaron los dos surcos interiores con todas las plantas existentes.

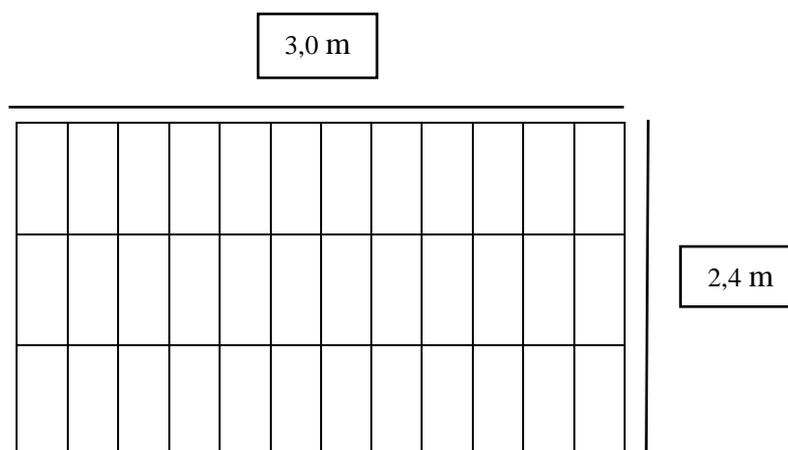


Figura 3: Diseño de la parcela experimental

3.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS USADOS EN EL ENSAYO

Los instrumentos y equipos empleados se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Instrumentos y equipos utilizados

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO	CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIÓN
Horno de mufla	Marca Nabertherm Rango 1600 °C	Pruebas de pirólisis
Balanza analítica	Marca Mettler Toledo XSE. Precisión 0,01 mg	Pesaje de muestras
Estufa	Marca Memmert UFP 800 DW. Rango 250 °C	Secado de suelo (densidad)
Potenciómetro pH-metro	Marca Inolab 7110 Calibrado con buffer 7	Medida del pH
Medidor de conductividad	Marca Consort C 860 Calibrado con solución	Determinación de salinidad
Molino de trituración	Molino eléctrico de martillos TL 3000	Desintegrar la biomasa
Tamices	Cribas de 4 mm	Cernido del biochar
Morteros, probetas, vasos	varios	Trituración de cenizas y preparación de diluciones

EQUIPOS DE CAMPO	CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIÓN
Horno de pirólisis de doble cámara	Fabricación artesanal Capacidad 30 galones	Producción de biochar
Teodolito y equipo topográfico	Marca Topcon DT 209 Campo de vista 1° 30'	Emplazamiento del ensayo
Equipo GPS	Marca Garmín Montana 680. Precisión 3 m	Geo referenciación
Termómetro digital	Marca Enno Logic Dual Laser Infrared 650 °C	Control de temperatura
Medidor de humedad	Marca Agra Tronix MT-PRO. Calibrado al 13%	Nivel de humedad en maíz
Cámara fotográfica	Marca Nikon Coolpix AW-130	Registro fotográfico
Cintas y flexómetro	Varios	Alturas y espaciamentos
Equipo de campo	Varios	Siembra y cultivo

3.4. ELABORACIÓN DEL BIOCHAR

3.4.1. Recolección de la biomasa residual de eucalipto

Todo el material vegetal para el biochar utilizado en la presente investigación, se obtuvo del bosque de eucalipto de la variedad *Eucalyptus globulus*, de la granja de Machangara, de la Unidad Académica de Agricultura, Silvicultura, Pesca y Veterinaria de la Universidad Católica de Cuenca (UCACUE), ubicada en el cantón Cuenca.

El área del bosque está localizada a una altura de 2450 ms.n.m. la formación vegetal corresponde a un bosque coetáneo y homogéneo de eucalipto en un 90 por ciento, de 50 años. El material vegetal de biomasa residual recogido, fue de dos tipos: uno de ramas desprendidas y otro de cortezas caídas (ritidoma), ambos tipos consistentes en material muerto depositado en la superficie del suelo. Para el efecto se buscó uniformidad en los tamaños y diámetros, además toda la muestra vegetal fue recolectada en estado seco.

3.4.2. Determinación de las condiciones de pirólisis a nivel experimental

Esta actividad fue realizada en la localidad de Azogues, provincia del Cañar. Para este propósito se establecieron dos procedimientos de acuerdo al proyecto planteado (pirólisis rápida y pirólisis lenta). El propósito de la actividad fue establecer a escala experimental los procedimientos y las condiciones apropiadas para la producción del biochar en esa latitud y altura.

(a) Pirólisis rápida

Las pruebas de elaboración del biochar, se realizaron en el “Laboratorio de Calidad de la Empresa Cementera Industrias Guapan” del Ecuador, contando con sus equipos de precisión y donde se realizaron las pruebas de pirólisis de la biomasa a diferentes temperaturas: 250, 400 y 550 °C (Gilces Reyna, 2014; Torres-Sallan *et al.*, 2014).

Se utilizó un horno de mufla programable, poniendo las muestras en un contenedor durante un tiempo de dos horas. Esta acción se realizó tanto para la muestra de ramas, cuanto para la muestra de cortezas.

Condiciones de laboratorio

Temperatura ambiental: 22 °C.

Humedad ambiental: 44 por ciento

Biomasa: Cortezas secas: 15,08 g Biocarbón obtenido: 3,89 g

Ramas secas: 20,04 g Biocarbón obtenido: 6,17 g

(b) Pirólisis lenta

Esta actividad se realizó en el sector de Uchupucún, de la parroquia Aurelio Bayas, del cantón Azogues, mediante pirólisis bajo tierra y siguiendo el procedimiento de elaboración de las carbonerías de la zona. Para reducir la entrada de oxígeno en la muestra, se colocó la biomasa en contenedores metálicos de un cuarto de litro, los mismos que no fueron utilizados en ninguna actividad anterior, para evitar alteraciones en los productos de carbón obtenidos.

En los recipientes metálicos se realizaron pequeños agujeros para la salida de gases e inicio de la pirólisis (Agricultura Regenerativa). Los tarros se colocan conjuntamente con la biomasa de producción de carbón vegetal general y se dejan pequeños respiraderos en el montículo para salida de gases. El material se procesó en un lapso de cuatro a seis días, dependiendo de los escenarios ambientales, cuidando de mantener sin ingreso de oxígeno.

Condiciones del medio

Temperatura ambiental: 18 °C.

Humedad ambiental: 52 por ciento

Tipo de suelo: Arcilloso

Altitud: 2550 ms.n.m.

Biomasa: Cortezas secas: 209 g Biocarbón obtenido: 57 g
 Ramas secas: 305 g Biocarbón obtenido: 70 g



Figura 4: Resultados del biochar procesado de forma experimental

3.5. PRUEBAS DE GERMINACIÓN EN SEMILLAS DE MAÍZ

Esta labor se realizó en las instalaciones del laboratorio de Fertilidad de Suelos de la UNALM, donde se efectuaron las pruebas de respuesta de las semillas ante el biochar obtenido a nivel experimental y la biomasa sin tratar. El Propósito de las pruebas de germinación, fue determinar el efecto de aplicación de biochar en la semilla de maíz, para establecer la dosis de aplicación más adecuada en el cultivo, mediante pruebas de germinación en extracto acuoso con semillas de maíz a nivel de laboratorio.

3.5.1. Semillas utilizadas

Para la labor de germinación, se empleó semillas de maíz de la variedad PM-213, la misma que fue liberada por la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria la Molina. Para las pruebas de germinación se utilizó la cantidad de 20 semillas por bandeja de germinación.

3.5.2. Pruebas preliminares de germinación

Esta aproximación inicial de comprobación, consistió en realizar verificaciones de germinación en las semillas sin ningún tratamiento, únicamente con agua deionizada, para: tener una estimación de la viabilidad de la semilla, la efectividad del procedimiento (tanto de materiales empleados, cuanto del lugar con mejor respuesta) y también poder establecer las cantidades de disolución necesarias, los días en que las semillas germinan y alcanzan un

desarrollo mayor a cinco centímetros; además de otros aspectos inherentes a la investigación (Antuna *et al.*, 2003).

En las observaciones preliminares se determinó lo siguiente:

- La cantidad de disolución necesaria para toda la prueba fue de 80 ml, poniendo 20 ml al inicio (diez para mojar el papel toalla y diez para humedecer las semillas que han sido colocadas en la bandeja de germinación), posteriormente se fue adicionando la solución, de forma regular y cuidando que no exista exceso ni deficiencia.
- A los cinco días se observó, una germinación del ciento por ciento de la semilla. Lo que confirmó la excelente viabilidad de la variedad y su desarrollo en el entorno del laboratorio, con lo que se estableció el tiempo requerido para las evaluaciones.
- En cuanto a la ubicación, se encontró que las semillas más próximas a las ventanas del laboratorio, eran influenciadas por el calor y aceleraban su proceso germinativo, aspecto que sirvió para posteriormente tener cuidado de este factor, buscando un espacio sin interferencias térmicas y de luz solar.
- También se estableció la necesidad de colocar todas las semillas con el embrión hacia arriba, para tener una clara observación de los brotes de la radícula y la gémula y no manipular posteriormente las semillas, lo que podría afectar su desarrollo.

3.5.3. Preparación de la fase sólida para las diluciones

El material utilizado para la preparación de las diluciones en laboratorio, fue el biocarbón pirolizado en las pruebas que se realizaron en el austro ecuatoriano. En lo concerniente a los tratamientos con la biomasa sin tratar (ramas y cortezas), se utilizó material residual consistente en ramas y cortezas externas de eucalipto, traídas de la misma zona donde se recolecto las muestras de biomasa para las pruebas de pirólisis.

La preparación previa del material, consistió en triturar el biocarbón en un mortero de laboratorio, hasta obtener una pasta fina. Para el caso de la biomasa, fue primero necesario fragmentar en pedazos finos y posteriormente molerlas, a fin de lograr partículas más pequeñas para preparar las mezclas.

3.5.4. Elaboración de diluciones

Para este trabajo previo a la germinación, se realizaron diluciones de agua deionizada (procesada con los equipos del laboratorio de Fertilidad de la UNALM), mezclada con biochar o biomasa en tres niveles de concentración, como se muestra en el Cuadro 11.

Cuadro 11: Tratamientos analizados

MATERIAL	TIPO DE PIRÓLISIS	DOSIS
Biochar cortezas	lenta	alta – media - baja
Biochar cortezas	rápida	alta – media - baja
Biochar ramas	lenta	alta – media – baja
Biochar ramas	rápida	alta – media - baja
Biomasa cortezas	sin pirólisis	alta – media - baja
Biomasa ramas	sin pirólisis	alta – media – baja
Blanco	sin pirólisis	sin dosis

Gilces Reyna (2014) estableció parámetros aplicables para las dosis en las diluciones: volumen sobre volumen en la siguiente relación: dilución en extracto acuoso 1:10. Trabajos similares establecieron (2,5), (5) y (7,5) toneladas por hectárea, que se recomiendan para aplicación como enmienda al suelo en investigaciones con biochar (Khan *et al.*, 2015).

Cuadro 12: Dosis de dilución utilizadas

DOSIS	FASE SOLIDA BIOCHAR (ml)	FASE LÍQUIDA AGUA DEIONIZADA (ml)
Baja	1	15
Media	1	10
Alta	1	5

Para probar la germinación, también se incluyeron tratamientos de biomasa residual tanto de cortezas, cuanto de ramas sin pirolizar y en las mismas tres dosis, para comparar el resultado de posibles afectaciones en la germinación, simulando las condiciones a nivel de campo en los cultivos de maíz, además de un blanco solo con agua deionizada, dando un total de 19 bandejas de germinación con 20 semillas de maíz cada una.

La cantidad de dilución preparada por tratamiento fue de 80 ml, las cuales se llevaron a envases esterilizados de plástico de 100 ml con la respectiva codificación. Posteriormente estos tratamientos se clasificaron y etiquetaron para cada caso.

Una vez codificadas las muestras, se realizaron los análisis iniciales, para determinar conductividad eléctrica y pH de la dilución. Para este propósito se utilizaron los equipos del laboratorio de Ciencias Ambientales de la UNALM.

3.5.5. Germinación de las semillas y datos tomados

Con el objeto de determinar la dosis y descartar el posible efecto fitotóxico de la aplicación de biochar a la semilla, se efectuaron las pruebas en extracto acuoso, utilizando el material genético de maíz variedad PM-213, en un número de 20 semillas en cada una de las 19 bandejas de germinación (Mendez *et al.* 2008; Pariona *et al.*, 2016). Se mantuvo óptimos niveles de humedad para el desarrollo de las plántulas y se tomaron los datos expresados en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Características analizadas durante las pruebas de germinación

NÚMERO DE EVALUACIÓN	DATOS REGISTRADOS
1	pH inicial de las 19 diluciones
2	conductividad eléctrica de las 19 diluciones
3	Porcentaje de germinación a las 24 h
4	Porcentaje de germinación a las 36 h
5	Porcentaje de germinación a las 48 h
6	Porcentaje total de germinación de radículas a las 60 h
7	Porcentaje del brote de plúmulas a las 60 h
8	Porcentaje del brote de plúmulas a las 72 h
9	Porcentaje del brote de plúmulas a las 84 h
10	Porcentaje total del brote de plúmulas a las 84 h
11	Porcentaje crecimiento sobre la valla de 3 cm a los 8 días
12	Porcentaje crecimiento sobre la valla de 4 cm a los 9 días
13	Porcentaje crecimiento sobre la valla de 5 cm a los 10 días
14	Porcentaje crecimiento sobre la valla de 7 cm a los 11 días



Figura 5: Pruebas de germinación en diluciones

3.6. ELABORACIÓN DEL BIOCHAR PARA EL CULTIVO

3.6.1. Calculo del material requerido para el cultivo

El material preparado para la validación en campo se expresa en el Cuadro 14.

Cuadro 14: Requerimiento total de biochar para el cultivo

TIPOS DE BIOCHAR	BIOMASA UTILIZADA	REPET.	TOTAL PARCELA	SUPERF. 7.2 m ²	TOTAL kg	
Producido en horno pirólisis rápida (Pr)	a). Cortezas (C)	Pr C x 4	4	28,8	14,4	
	b). Ramas(R)	Pr R x 4	4	28,8	14,4	
	c) Cortezas 50% + ramas 50%	(C + R)	Pr C+R x 4	4	28,8	14,4
	SUB TOTAL			12	86,4 m ²	43.2 kg
Producido en el suelo pirólisis lenta (Pl)	a). Cortezas (C)	Pr C x 4	4	28,8	14,4	
	b). Ramas(R)	Pr R x 4	4	28,8	14,4	
	c) Cortezas 50% + ramas 50%	(C + R)	Pr C+R x 4	4	28,8	14,4
	SUB TOTAL			12	86,4 m ²	43,2 kg
			TOTAL	172,8 m²	86,4 kg	
		0.5 kg/m ²	Dosis por parcela: 3.6 kg/7.2 m ²			

3.6.2. Preparación de biochar por el método de pirólisis rápida en horno.

Para la construcción del horno de pirólisis, se siguió el diseño propuesto por el Departamento de Montes de la FAO y Reents (2014) de North Carolina State University. El horno construido para el efecto fue del tipo retorta, es decir con doble cámara. Una externa de combustión y otra interna de pirólisis. Para la construcción del horno se empleó un tanque de 55 galones de hierro y dos tanques interiores que funcionaron como reactores de pirólisis, con capacidad de 15 galones cada uno.

Una vez realizado el saneamiento del horno con la primera quema, se procedió a preparar el biochar de los dos tipos de biomasa. El tiempo promedio de quema fue entre dos y tres horas, dependiendo de la hora del día y las condiciones ambientales. En cada carga se cuidó de incluir en los reactores el mismo tipo de biomasa. El control de temperatura se realizó con un termómetro digital, proporcionado por la Cementera Guapan. Se pudo apreciar que la temperatura tiende a subir, cuando el material de combustión es muy grueso. Fue necesario realizar repetidas quemas hasta lograr la cantidad requerida de biochar para la siembra.



Figura 6: Horno de pirólisis y biochar producido

3.6.3. Preparación de biochar por el método de pirólisis lenta bajo tierra.

Para este caso se realizó la pirólisis dentro de la tierra, de acuerdo a las pruebas anteriores y siguiendo el procedimiento de elaboración de carbón de las carbonerías de la zona, con restricción de la entrada de oxígeno en el material a carbonizar. Este procedimiento duró entre cuatro y seis días, dependiendo de condiciones climáticas, hasta el descenso de la temperatura y poder extraer el carbón.



Figura 7: Elaboración de biochar bajo tierra

3.6.4. Trituración, clasificación y pesaje y del biochar

El material resultante fue triturado de forma manual en saquillos, para su posterior uso en el campo. Los tratamientos fueron pesados y dispuestos en bolsas plásticas para cada una de las parcelas y repeticiones, insertando en cada una de ellas la debida codificación.



Figura 8: Triturado manual del biochar

3.7. SIEMBRA DEL CULTIVO DE MAÍZ.

El ensayo de aplicación de biochar en el cultivo de campo, se realizó en los predios de la granja de la Estación Experimental del Austro, del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP). El propósito fue determinar a nivel del cultivo en campo, el comportamiento del biochar, elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto en el rendimiento del maíz y los efectos en el suelo, mediante la aplicación del biocarbón como enmienda.

3.7.1. Condiciones de la siembra

la siembra del cultivo se realizó el día miércoles 5 de octubre de 2016, de acuerdo al protocolo de siembra establecido, en un terreno destinado únicamente a cultivo de maíz para emplazar el ensayo dentro de esta área, con el objeto de eliminar efectos de borde e interferencia de condiciones externas a la zona del ensayo.

La desinfección de semillas se realizó con Rurano (Thiodicarb), en la dosis de 15 ml de producto por kilogramo de semilla. Los tratamientos fueron distribuidos en cuatro repeticiones, donde se realizó la aleatorización para cada una de las columnas de repeticiones. Cada parcela fue debidamente codificada y rotulada con letreros de madera, como se indica en el ANEXO 1.

El cultivo anterior a la siembra del ensayo, fue de papas de la variedad “Super Chola” en suelo sin fertilización y el área estuvo en barbecho por dos meses. Las labores previas de preparación de la siembra fueron: arado, rastrado y surcado a 80 cm, la distancia entre plantas

fue de 20 cm con dos semillas por golpe, para en un posterior raleo dejar una sola planta, escogiendo la más vigorosa.



Figura 9: Siembra de los tratamientos

3.7.2. Variedad de semilla utilizada

Para este ensayo, se sembraron semillas de maíz del Programa de Maíz, utilizando la variedad “INIAP 103 *Mishqui Sara*” (maíz nutritivo). El material genético proviene de la variedad “*Aycha Sara 101*” del Centro de Fitogenética de Pairumani Bolivia. La semilla certificada, fue proporcionada por el Programa de Maíz del INIAP.



Figura 10: Desarrollo del cultivo

3.8. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Los análisis Físicoquímicos de biomasa, biochar, suelo y nutrientes foliares, se realizaron en los laboratorios de Análisis de suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina de Lima-Perú (UNALM).

Los estudios complementarios de campo, se efectuaron en los laboratorios de la Estación Experimental del Austro, del Instituto Nacional de Autónomo de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP). Las normas utilizadas se expresan en el Cuadro 15.

Cuadro 15: Normas utilizadas en los análisis

DETERMINACIÓN	NORMA UTILIZADA
pH	pH in water. Reference: A System for Classifying, Indexing and Filing Agricultural Publications AGDEX (1989). (Rajkovich <i>et al.</i> , 2011).
C.E.	Electrical conductivity in water. Reference: (Rajkovich <i>et al.</i> , 2011). Test Methods for the Examination of Composting and Compost TMECC 4.11 (2001). International Biochar Initiative IBI (2012).
M.O.	C.Org = C.Tot-C Inor. Reference: American Society for testing and Materials ASTM. D 4373-14 and Centre d' Expertise en Analyse Environnementale du Québec CEAEQ (2009-2013) and International Organization for Standarization ISO 9686 (2006). % M.O. = % C.Org x 1.724.
N	Total dry combustión, elementary analysis. Reference: Adapted from (Meng <i>et al.</i> , 2014) and (Brewer, 2012). Using Leco Truspect.
P, K, Ca, Mg, Na	Modified Dry ashing followed by ICP (Enders and lehman 2012). 500 °C ashing followed by HNO ₃ and H ₂ O ₂ digestion and determination ICP-OES analysis.
S	Total dry combustión, elementary analysis. Reference: Adapted from (Meng <i>et al.</i> , 2014) and (Brewer, 2012).
Humedad	Dried in owen at 105 °C (24 h) or 70 °C (72 h). Reference: Adapted from ASTM D 1762-84.
Cenizas	IBI test method. ASTM 1762-84. Standard test method for chemical analysis of Wood.
C. Total	Total dry combustión. Reference: Adapted from (Meng <i>et al.</i> , 2014), (Brewer, 2012). and (Leco, 2009)
C. Inorgánico	Quick determination of carbonate in soil. Reference: ASTM D 4373-14 and CEAEQ (2009, 2013) and ISO 9686 (2006).
Densidad aparente	Tapped density after 3 drops of 0,15 m. Reference: Adapted from ISO 5311 (1992).
Densidad real	Gas pycnometer. Reference: ASTM B 923-10
B	TMECC (2011).
Fe, Cu, Zn, Mn	Modified ash methods. Reference: (Ender and Lehmann, 2012). IBI (2012).
CIC	Modified ammonium acetate (NH ₄ -OAC) method (buffered at pH 7). Base don displaced ammonium (NH ₄) in potassium chloride (KCl) extracts after removing excess NH ₄ -OAC with alcohol in batch mode.
Ultimate analysis	Resident carbón. (Degryze <i>et al.</i> , 2010).
Volatile matter	ASTM D 1762-82 standard test method for chemical analysis of Wood charcoal VM content at 950 °C for 10 minutes.

FUENTE: Ing. Juan Miguel Guerrero Lázaro LASPAF-UNALM

Los procedimientos de laboratorio utilizados, se muestran en el ANEXO 2.

3.9. TIPO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

3.9.1. Tipo de investigación

La investigación “Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano”, fue del tipo experimental, método que permite establecer relaciones de causa-efecto.

El trabajo de investigación, comenzó con la fundamentación bibliográfica de la propuesta, el proyecto fue aprobado oficialmente por el Consejo de la Escuela de Posgrado en mayo del 2016. El trabajo investigativo tuvo como propósito establecer, con niveles aceptables de confiabilidad, la relación del biochar de biomasa residual de eucalipto aplicado al suelo, en la producción del cultivo de maíz en la zona austral del Ecuador. La actividad de siembra del cultivo, se cumplió durante el ciclo agrícola octubre de 2016 a abril de 2017.

La investigación se realizó en dos escenarios, la una a nivel de campo en la provincia del Azuay en la república del Ecuador y la otra de gabinete y laboratorio en la Universidad nacional Agraria La Molina de Lima Perú, de acuerdo a los protocolos establecidos previamente para cada caso.

3.9.2. Variables

Las variables estudiadas se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16: Variables de estudio

TIPO DE VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
	Rendimiento del maíz:	
RESPUESTA EN LA VARIABLE DEPENDIENTE	- Peso de granos en seco	(t ha ⁻¹)
	- Peso de choclo	(t ha ⁻¹)
	- Peso de biomasa en materia seca	(t ha ⁻¹)
	- Índice de área foliar	(IAF)
	- Altura de planta	(m)
	- Diámetro de tallo	(cm)
	- Contenido de N-P-K en fruto	(%)
	- Contenido de proteína en fruto	(%)
	- Análisis químico y densidad de Suelos en campo	(varios)

VARIABLES INDEPENDIENTES	- Tipos de materia prima usada para la preparación del biochar	(2)
	- Formas de pirólisis de la biomasa en la elaboración del biochar	(2)

3.9.3. Tratamientos

Los tratamientos evaluados, se obtuvieron con la combinación de las dos formas de elaboración de biochar, (a) pirólisis rápida en horno de doble cámara y (b) pirólisis lenta, realizada bajo tierra, con las dos clases de biomasa residual utilizada (cortezas externas y ramas, además de una mezcla a partes iguales de ambas), también se incluyó un tratamiento “control” (blanco o testigo) sin aplicación de ninguna clase de biochar y un tratamiento “fertilizado” de acuerdo a las recomendaciones de la Guía de Manejo de la variedad “INIAP 103 *Mishqui Sara*” del Programa de Maíz (INIAP, 2010). Los tratamientos determinados para el ensayo de campo, se detallan en el Cuadro 17.

Cuadro 17: Combinación de tratamientos y codificación

TRATAMIENTOS	BIOCHAR	TIPO DE BIOMASA	CODIFICACIÓN
1	Producido en horno pirólisis rápida (Pr)	Cortezas (Cor)	Pr-Cor
2	Producido en horno pirólisis rápida (Pr)	Ramas (Ram)	Pr-Ram
3	Producido en horno pirólisis rápida (Pr)	Cortezas 50% + ramas 50% (Cor + Ram)	Pr-Cor + Ram
4	Producido bajo el suelo pirólisis lenta (Pl)	Cortezas (Cor)	Pl-Cor
5	Producido bajo el suelo pirólisis lenta (Pl)	Ramas (Ram)	Pl-Ram
6	Producido bajo el suelo pirólisis lenta (Pl)	Cortezas 50% + ramas 50% (Cor + Ram)	Pl-Cor + Ram
7	--	--	Control
8	--	--	Fertilizado*

* Recomendación de la Guía de Manejo de la variedad (INIAP, 2010).

3.10. DISEÑO PROCEDIMENTAL

3.10.1. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado en campo fue Bloques Completos al Azar con arreglo factorial $(2 \times 3 + 1 + 1) \times 4$. Dos tipos de biochar por tres tipos de biomasa. Un control sin aplicación de biochar más un tratamiento fertilizado. Todo en cuatro repeticiones.

El *software* estadístico utilizado para el análisis de los datos fue el programa estadístico de análisis "INFOSTAT".

Total de tratamientos:	8
Total de parcelas:	32
Tamaño de la parcela:	3,00 x 2,40 m = 7,20 m ²
Área total de terreno utilizado:	360,4 m ² (17 x 21,2 m)

La aleatorización se realizó con los ocho tratamientos en cada uno de los cuatro bloques de repeticiones establecidos.

Con el objetivo de poder comparar los resultados, en las mismas condiciones de la información a nivel mundial, la siembra y cosecha se llevó siguiendo la metodología para evaluar el rendimiento en maíz del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo de México (CIMMYT) , calculando para grano seco con 13 por ciento de humedad. El cultivo, se realizó acorde a las prácticas y recomendaciones del Programa del Maíz, con las guías de manejo agronómico de la variedad “INIAP 103 *Mizhqui Sara*”.

3.10.2. Métodos estadísticos utilizados

Los métodos utilizados para el análisis estadístico de los componentes de las variables del rendimiento fueron:

- (a) Modelos lineales generales y mixtos, utilizando máxima verosimilitud, con ANOVA de una vía y pruebas de hipótesis para contrastes en:
 - Rendimiento en peso de granos de mazorca ($t\ ha^{-1}$)
 - Rendimiento en peso de choclo ($t\ ha^{-1}$)
 - Índice de área foliar (IAF)
 - Peso de biomasa en materia seca (MS) ($t\ ha^{-1}$)
 - Altura de plantas (m)
 - Diámetro de tallos (cm)
 - Densidad y porosidad del suelo

- (b) Análisis de ordenación no restringida con examen de componentes principales en:
 - Caracterización de biomasa y biochar
 - Contenido de macronutrientes (N-P-K) del grano
 - Caracterización de suelos por tratamientos

3.10.3. Inferencia estadística

Hipótesis planteada:

- H_p Todos los tratamientos del rendimiento tienen el mismo efecto
- H_a Al menos un tratamiento es distinto o diferente a los demás

3.11. ANÁLISIS DE DATOS EN CAMPO

3.11.1. Rendimiento en peso de granos de mazorca ($t\ ha^{-1}$)

Para esta variable se evaluaron la totalidad de mazorcas de las plantas, en los dos surcos interiores de la parcela, utilizando la metodología del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo de México (CIMMYT), ajustando la humedad al 13 por ciento, de la medición existente en la cosecha. Para este efecto se evaluaron todas las mazorcas de las filas dos y tres (CIMMYT, 2017).



Figura 11: Cosecha de mazorcas y pesaje del grano

3.11.2. Rendimiento en peso de choclos ($t\ ha^{-1}$)

En esta evaluación, se pesaron todos los choclos de cuatro plantas de los surcos exteriores de cada parcela, observando que tengan competencia completa, si no existía esta condición, se medía la anterior (se evaluó las plantas cuarta y octava, de las filas uno y cuatro). Se pesaron todos los choclos existentes con olotes y sin brácteas.

El total de peso de choclos por cada parcela corresponde a $0,64\ m^2$, dado que las plantas fueron sembradas a $0,80\ m$ entre surcos y $0,20\ m$ entre plantas (cada planta ocupa $0,16\ m^2$). Este valor se escaló a toneladas por hectárea.



Figura 12: Cosecha de maíz en choclo

3.11.3. Índice de área foliar (IAF)

Para esta medición se evaluaron dos plantas de cada parcela de las filas uno y cuatro en estado de choclo. El valor adimensional, se lo proceso a partir de la medición del largo y ancho de cada una de las hojas existentes. De esto se sacó el área por hoja multiplicando por el factor 0,75.

La sumatoria de las áreas de hojas existentes en cada planta, se dividió para el área cubierta, las plantas fueron sembradas a 0,80 m entre surcos y 0,20 m entre plantas. Luego se promedió los dos índices para obtener una media por parcela (Camacho *et al.*, 1995).



Figura 13: Medidas del índice de área foliar

3.11.4. Peso de biomasa en materia seca (MS) ($t\ ha^{-1}$)

En este aspecto se evaluaron cuatro plantas de cada parcela, observando que tengan competencia completa, si no existía esta condición se medía la anterior (las plantas cuarta y octava, de las filas uno y cuatro).

El peso total de la biomasa se lo obtuvo con: el de peso de brácteas y hojas más peso tallos y peso de choclos por cada parcela que corresponde a $0,64\ m^2$, dado que las plantas fueron sembradas a $0,80\ m$ entre surcos y $0,20\ m$ entre plantas. Este valor se escaló a toneladas por hectárea, transformándoles para el análisis a valores en materia seca.



Figura 14: Peso de la biomasa del maíz

3.11.5. Altura de plantas (m) y diámetro de tallos (cm)

Para este propósito se evaluaron las mismas plantas cosechadas en choclo para el IAF de cada parcela. Luego se promedió los valores para obtener una media por parcela.



Figura 15: Medida de la altura y diámetro de plantas

3.11.6. Densidad y porosidad del suelo

La densidad aparente (DA) de campo, se realizó con el método de los cilindros (MC). Para el caso de la DA de campo antes del cultivo, la prueba se realizó el día previo a la siembra en todos los cuatro bloques de repeticiones. Posteriormente y al finalizar el ciclo total del cultivo, se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los tratamientos. Todo el proceso de secado y pesaje de las muestras se realizó en el laboratorio del Instituto de Investigaciones del Ecuador INIAP en Bullcay.

La utilización de cilindros de acero permite estimar la DA en campo, al extraer muestras de suelo sin disturbar y de volumen conocido.

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{peso suelo (g) / volumen del cilindro (cm}^3\text{)}.$$

La densidad real (DR) puede ser calculada en base a la relación peso seco de la muestra sobre volumen del cilindro, considerando que la mayor parte de los componentes del suelo (aluminosilicatos, sílice) poseen una densidad oscilante entre 2,6 y 2,7 g/cm³, se toma un valor medio de 2,65 g/cm³ (valor adoptado al realizar el análisis granulométrico).

La porosidad total del suelo, se refiere al volumen ocupado por las fases líquida y/o gaseosa, posee gran importancia en la penetración radicular, movimiento del agua y transporte de los nutrientes, difusión de los gases, etc. Puede ser calculada a partir de la DA y DR.

$$\text{Porcentaje de porosidad} = 100 \times \left(1 - \frac{DA}{DR}\right).$$



Figura 16: Toma de muestras en campo para la densidad

METODOLOGÍA SEGUIDA EN LA INVESTIGACIÓN

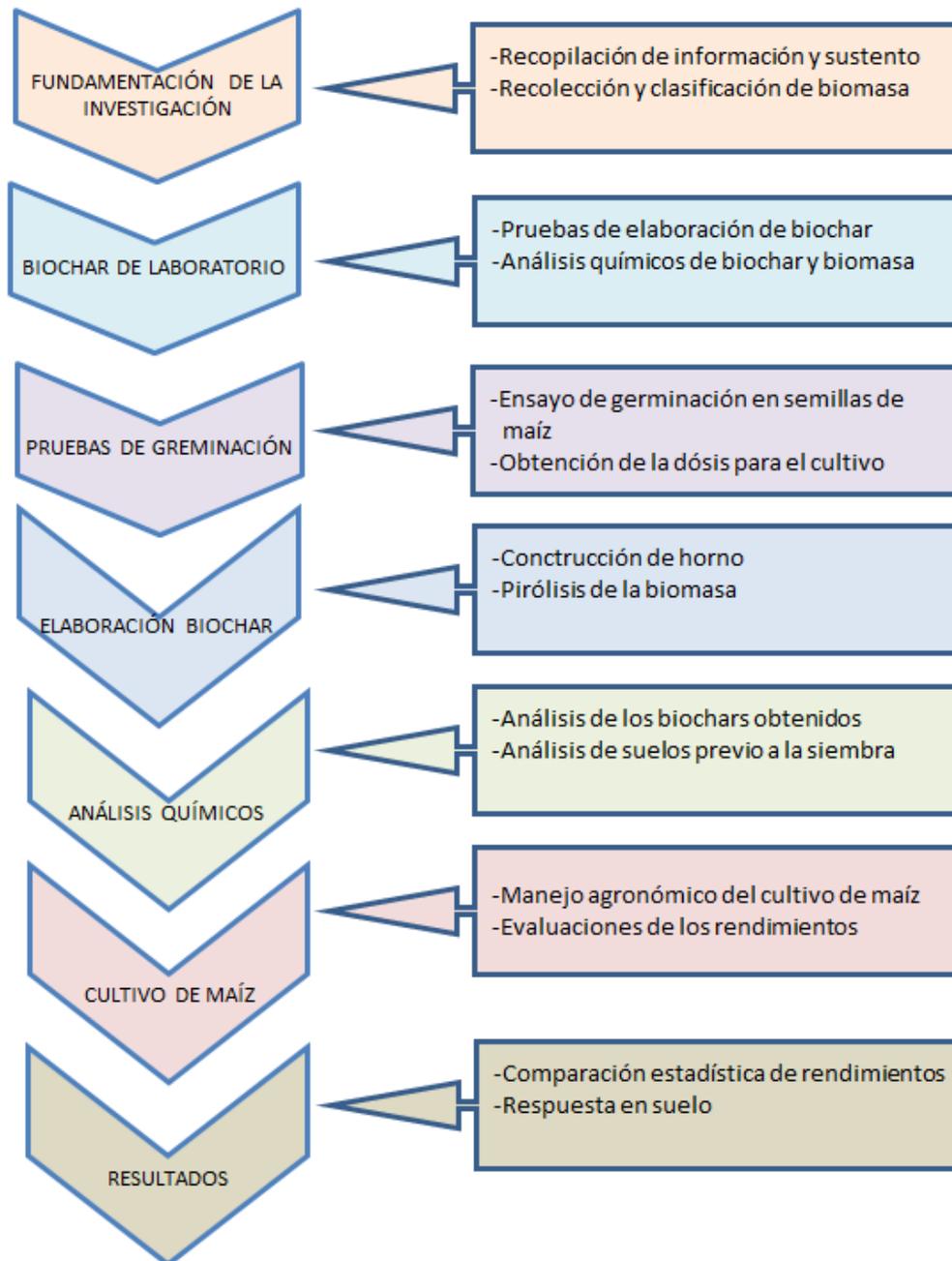


Figura 17: Esquema metodológico

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ELABORACIÓN DE BIOCHAR A NIVEL EXPERIMENTAL

OBJETIVO ESPECÍFICO.- Desarrollar a nivel de campo procedimientos para la elaboración de biochar a partir de ramas y cortezas de eucalipto (biomasa residual), mediante procedimientos de pirólisis rápida y lenta.

4.1.1. Pruebas en horno a diferentes temperaturas

Para determinar la temperatura óptima de pirólisis se realizaron las pruebas de obtención de biochar con las tres temperaturas en la mufla, comparando después las condiciones del biochar y la ceniza obtenida por tamizado en criba, con material menor de cuatro mm; convalidando con lo descrito por el Departamento de Montes (FAO, 2016), presentando los siguientes resultados:

Temperatura uno: 250 °C.- A pesar que la relación en volumen de ceniza sobre biomasa fue de tres por ciento, se obtuvo una muestra de biochar con notable cantidad de biomasa aun sin pirolizar.

Temperatura dos: 400 °C.- A esta temperatura se obtuvo las mejores condiciones de pirólisis con una muestra en la estructura del biochar uniformemente transformada y la relación en volumen de ceniza sobre biomasa fue de ocho por ciento.

Temperatura tres: 550 °C.- Para esta temperatura se observó una mayor cantidad de cenizas en el biochar obtenido, especialmente para la biomasa de cortezas, la relación en volumen de ceniza sobre biomasa fue de 17 por ciento.

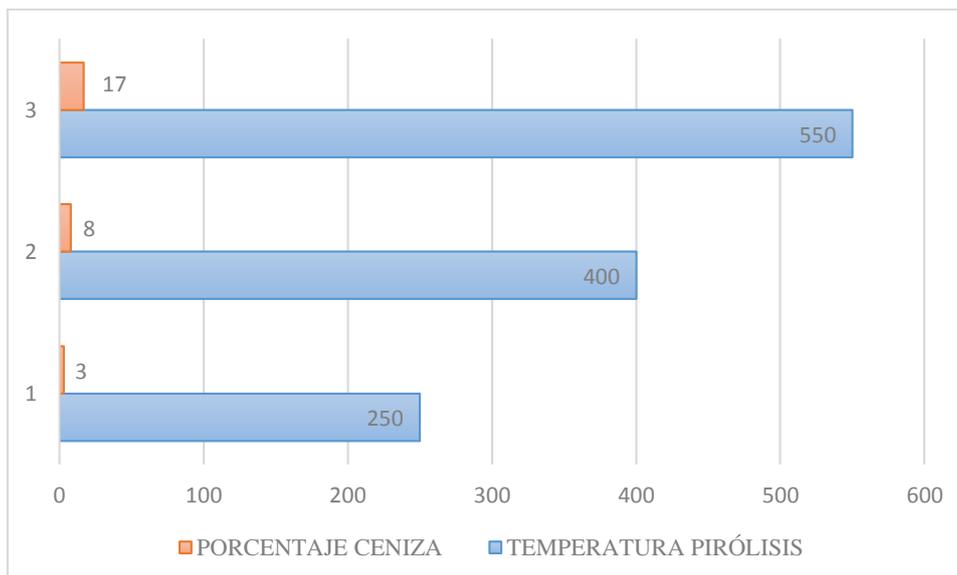


Figura 18: Influencia de la temperatura en la ceniza del biochar

4.1.2. Resultados obtenidos

(a) Pirólisis rápida

El mejor resultado en la relación ceniza sobre carbón, se consiguió a 400 °C y el procedimiento seguido fue: precalentando el horno a 160 °C. e incrementando la temperatura gradualmente a razón de dos grados Celcius por minuto durante dos horas, hasta alcanzar la temperatura total de 400 °C, luego se dejó enfriar la muestra. La biomasa inicial y el material carbonizado obtenido, fueron pesados antes y después del proceso de pirólisis.

Cortezas: La relación peso de biochar sobre peso de biomasa fue de 0,258.

Ramas: La relación peso de biochar sobre peso de biomasa de fue de 0,308.

Por lo encontrado se determinó que existe una mayor cantidad de biochar a partir de ramas que de cortezas, esto estaría explicado en función de la mayor cantidad de lignina contenida en la estructura del material.

(b) Pirólisis lenta

Las muestras de biochar resultantes presentaron una buena restructura, notando mejor firmeza en el biocarbón de ramas que el de cortezas, la cantidad de ceniza guarda relación a la obtenida en la pirólisis rápida. La biomasa y biochar resultante fue pesado antes y después del proceso. Es importante destacar que con este método resulta muy difícil controlar la temperatura.

Cortezas: La relación peso de biochar sobre peso de biomasa de fue de 0,273.

Ramas La relación peso de biochar sobre peso de biomasa de fue de 0,230.

En este método de pirólisis se obtiene una mayor cantidad de biochar a partir de cortezas que de ramas, esto puede atribuirse a la dificultad en el control de temperatura.

4.1.3. Relación porcentual del biochar obtenido y la biomasa pirolizada

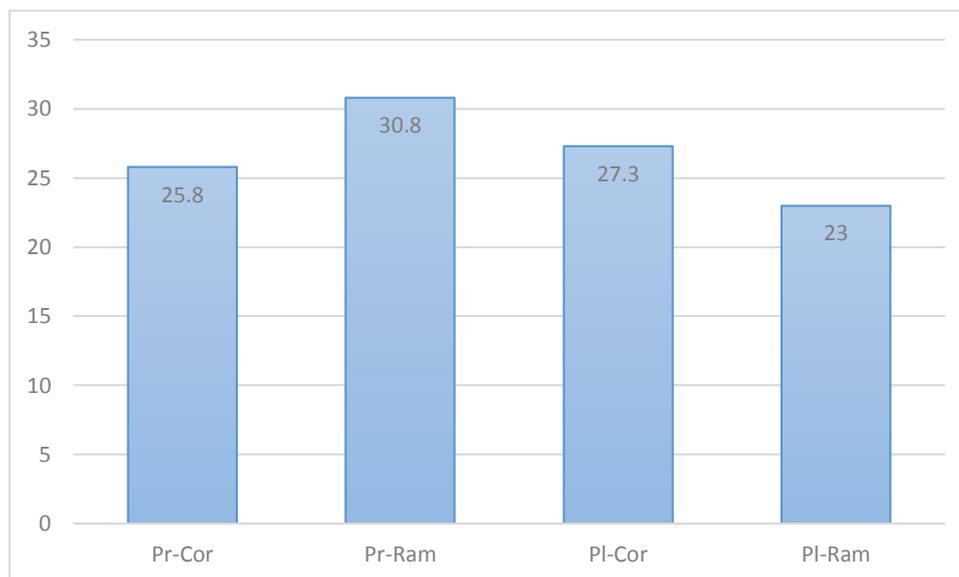


Figura 19: Relación porcentual de biochar obtenido

Escalante *et al.* (2016) indica que cuando se usan tecnologías de alta eficiencia para la producción de biochar, es posible alcanzar rendimientos en masa de alrededor del 30-40 por ciento.

Con el rendimiento promedio del 27 por ciento encontrado en este estudio, la producción potencial anual de biochar elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto en la provincia del Azuay, podría estimarse en 4163,94 toneladas por año, a partir de una superficie con cobertura de eucalipto de 13136,3 hectáreas (Gobierno Provincial del Azuay, 2015). Ponderando con la biomasa residual para eucalipto reportada en la investigación realizada en el Distrito Metropolitano de Quito Ecuador, que documenta una media de $1,174 \text{ t ha}^{-1}$ y por año (Suárez y Anchaluisa, 2013).

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR Y PRUEBAS DE GERMINACIÓN

OBJETIVO ESPECÍFICO.- Determinar en laboratorio las características físicas y químicas de los tipos de biochar, obtenidos a partir de los procedimientos de combustión y biomasa utilizada, además realizar pruebas de germinación en semillas de maíz, para establecer las dosis de aplicación en el cultivo de campo.

4.3. ESTUDIOS DE BIOMASA Y BIOCHAR

4.3.1. Análisis químicos de Biomasa y biochar

Este análisis tuvo como propósito caracterizar mediante el análisis Físico y Químico, los dos tipos de biomasa utilizada en la elaboración del biocarbón (ramas y cortezas) y los cuatro tipos de biochar, Los resultados se expresan en el Cuadro 18.

Cuadro 18: Caracterización de la biomasa y biochar obtenidos

DETERMINACIONES	BIOMASA	BIOMASA	BIOCH. PIR. RAPIDA		BIOCH. PIR. LENTA	
	CORTEZA	RAMAS	CORTEZA	RAMAS	CORTEZA	RAMAS
	EUCALIP.	EUCALIP.				
pH	4,61	5,24	7,91	11,09	10,36	9,91
C.E. (dS/m)	0,61	0,59	5,03	6,09	15,5	3,42
M.O. (%)	95,3	95,43	23,75	14,12	25,35	7,51
N (%)	0,64	0,57	0,84	0,45	0,59	0,31
P ₂ O ₅ (%)	0,05	0,06	0,5	0,52	0,54	0,24
K ₂ O (%)	0,08	0,2	1,75	1,84	1,94	0,64
CaO (%)	1,97	1,65	8,65	9,77	11,62	2,53
MgO (%)	0,2	0,28	1,3	1,04	1,44	0,38
Hd (%)	7,44	11,14	8,88	5,07	7	7,02
Na (%)	0,05	0,06	0,17	0,15	0,14	0,11
Cenizas (%)	2,95	2,65	17	18,43	23,18	5,33
S (%)	0,04	0	0,11	0,1	0,22	0,11
Fe (ppm)	349	323	8803	2640	3788	692
Cu (ppm)	9	6	18	23	19	9
Zn (ppm)	16	10	431	553	856	45
Mn (ppm)	675	144	858	1146	903	312
B (ppm)	11	12	64	63	60	38
CIC (meq/100 g)	40	42,8	33,6	22,8	15,2	12
Carbono Tot. (%)	56,2	56,51	48,14	47,31	44,56	54,91

Carbono Org. (%)	51,98	52,29	13,77	8,19	14,71	4,36
D. Apar. Recibida	0,675	0,747	0,473	0,49	0,368	0,696
D. Apar. Seca	0,666	0,656	0,337	0,46	0,364	0,601

FUENTE: Laboratorio de Análisis de suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF)

Los detalles del análisis comparativo del Cuadro 18, confirman las características especiales que tiene el biochar, en este análisis se pudo destacar los siguientes aspectos:

Potencial Hidrógeno (pH).- Como se puede ver en la Figura 20, la diferencia en los biochar con la materia sin pirolizar es notoria en valores del pH y tiende a ser más ácida (situación que también fue medida en las diluciones para las pruebas de germinación).

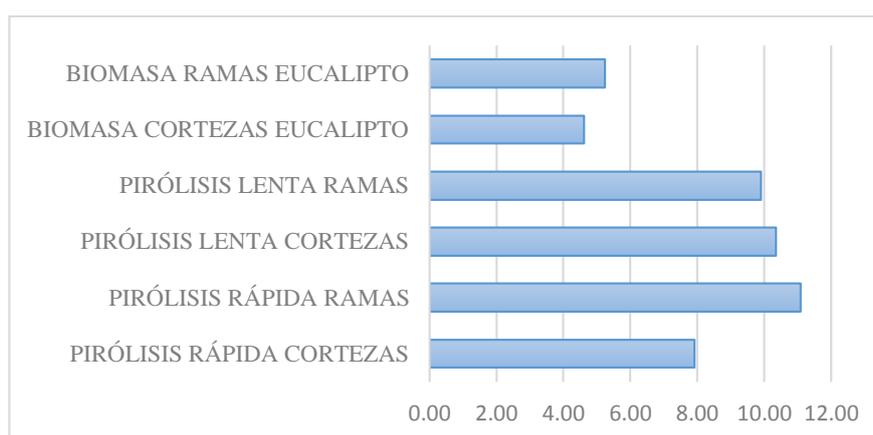


Figura 20: Niveles de pH en biomasa y biochar

El pH alto en el biochar es favorable para suelos ácidos, por cuanto puede actuar como compensador de acidez. Los valores fluctúan entre 7,91 y 11,09 estos valores obtenidos guardan relación con los estudios de:

Yadav *et al.* (2016) en el trabajo sobre biochar elaborado a diferentes temperaturas para modificar suelos, reporta pH entre 8,92 y 11,14.

Torres-Sallan *et al.* (2014), refieren en España para el biochar elaborado por pirólisis lenta con cepas de vid que han cumplido su ciclo de producción un pH de 10,5.

Guerra (2014) En su trabajo de biochars en la Amazonía peruana, producidos por pirólisis lenta en horno y analizados en los laboratorios de la UNALM, obtuvo pH entre 7,14 hasta 10,74.

Curiel (2016) En el estudio de producción de biochar a temperaturas de 350 a 600 °C, describe pH en un rango de 7,97 a 10,35.

Conductividad eléctrica (CE).- De acuerdo a la Figura 21, para la CE se puede apreciar diferencias entre los tipos de biochar, especialmente con la pirólisis lenta de cortezas que tiene el mayor valor (al igual que en las diluciones en las pruebas de germinación), aspecto que está directamente relacionado con el contenido de sales en el ritidoma. En el trabajo en la Amazonía peruana, se encontraron valores de 6,91 dS/m (Guerra, 2014).

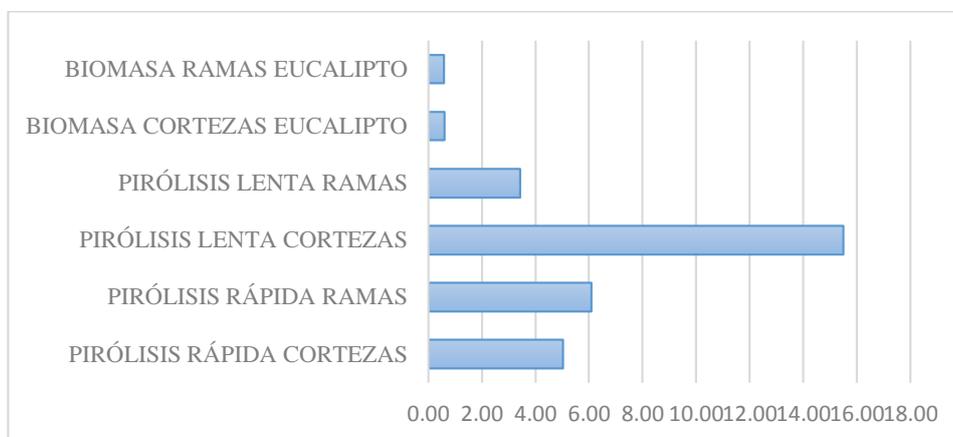


Figura 21: Conductividad eléctrica en biomasa y biochar (dS/m)

Nitrógeno (%).- De acuerdo a la Figura 22, los niveles del nitrógeno están en rangos de 0,31 a 0,84 por ciento, siendo el biochar por pirólisis rápida de ramas el que logra el mejor nivel. Estos valores son coincidentes con lo encontrado con cepas de vid que establece un porcentaje de 0,4 por ciento (Torres-Sallan *et al.*, 2014) y el estudio de caracterización de 60 tipos de biomasa en China, que establece rangos de 0,29 a 4,19 por ciento (Sun *et al.*, 2017).

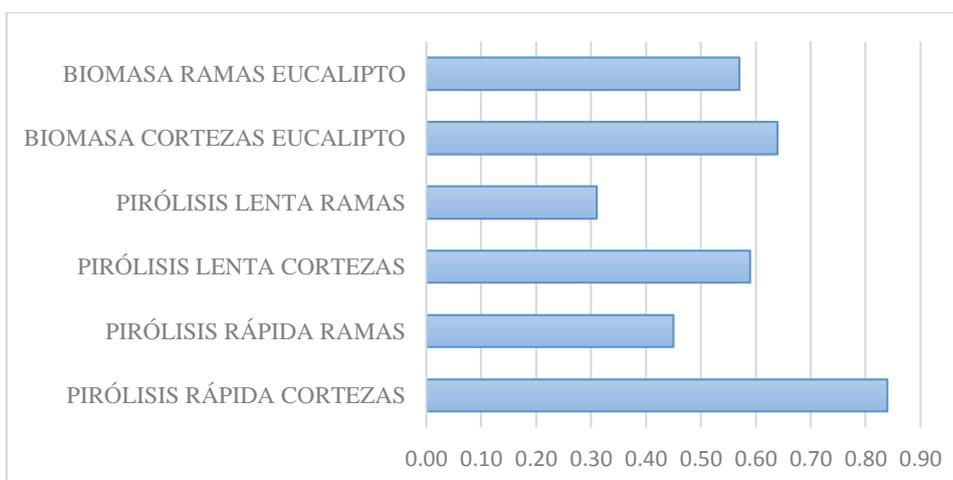


Figura 22: Porcentaje de nitrógeno para biomasa y biochar

Fósforo (%).- Como se muestra en la Figura 23, el contenido de fósforo presente en el biochar obtenido a partir de los diferentes procesos es similar en niveles del 0.50 por ciento,

a excepción del biochar por pirólisis lenta de ramas. Torres-Sallan *et al.* (2014) refiere un contenido de fósforo de 1,27 por ciento para el biochar de viñedos.

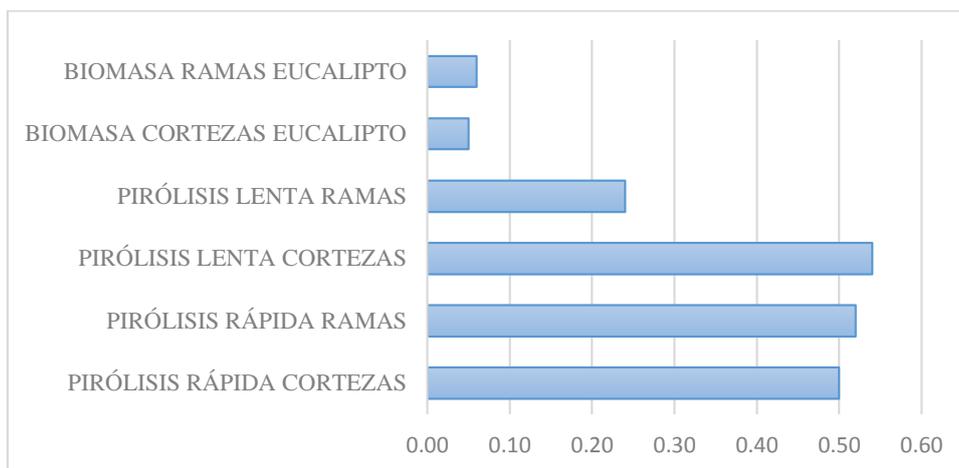


Figura 23: Porcentaje de fósforo para biomasa y biochar (P₂O₅)

Potasio (%).-Como se aprecia en la Figura 24, para este elemento se encontraron valores de 0.20 a 1,94 por ciento. Los biochars por pirólisis lenta cortezas y pirólisis rápida de ramas y cortezas tienen los mayores valores, en tanto que la biomasa tiene los menores valores.

Torres-Sallan *et al.* (2014) indican un valor de 1,6 por ciento de potasio.

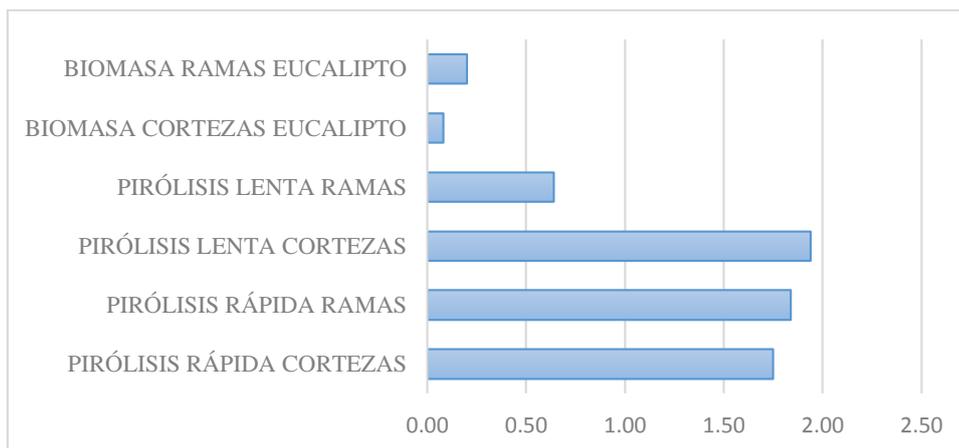


Figura 24: Porcentaje de potasio para biomasa y biochar (K₂O)

Cenizas.- Como se expone en la Figura 25, los valores encontrados en cenizas estuvieron entre el 5,33 y 23,18 por ciento. Esta condición permite una mayor disponibilidad de elementos al usar el biochar como enmienda. Curiel (2016) en su trabajo de elaboración de biochar a diferentes temperaturas reportó valores de ceniza entre 8,24 y 15,24 por ciento.

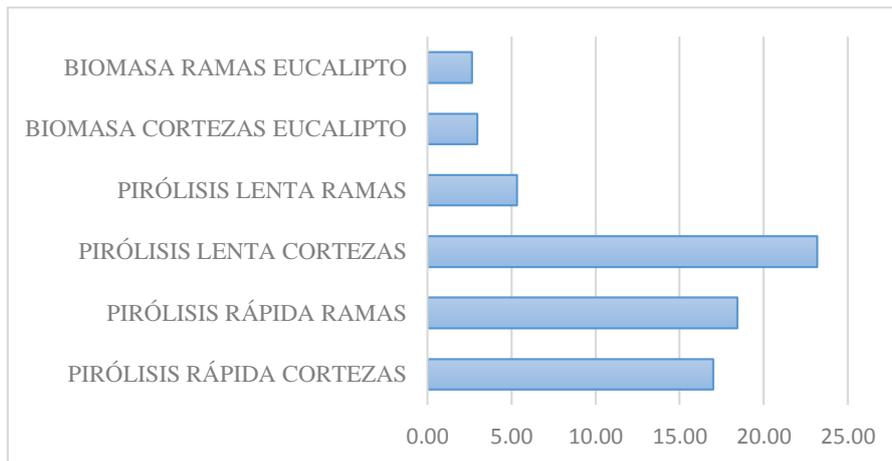


Figura 25: Porcentaje de cenizas para biomasa y biochar

Carbono total (%).- Como se observa en la Figura 26, la cantidad de carbono total en el biochar no difiere mayormente del que contiene la biomasa de eucalipto. Los rangos varían de 44,56 a 54,91 por ciento, lo que confirma la capacidad del biochar para conservar el carbono. En China, el estudio de caracterización de 60 tipos de biomasa llevados a biochar, obtuvo valores de carbono de 26,61 a 53,26 por ciento. (Sun *et al.*, 2017).

Guerra (2014) encontró valores de carbono en los ocho biochars estudiados con rangos que fluctuaron entre 34,92 y 89,47 por ciento.

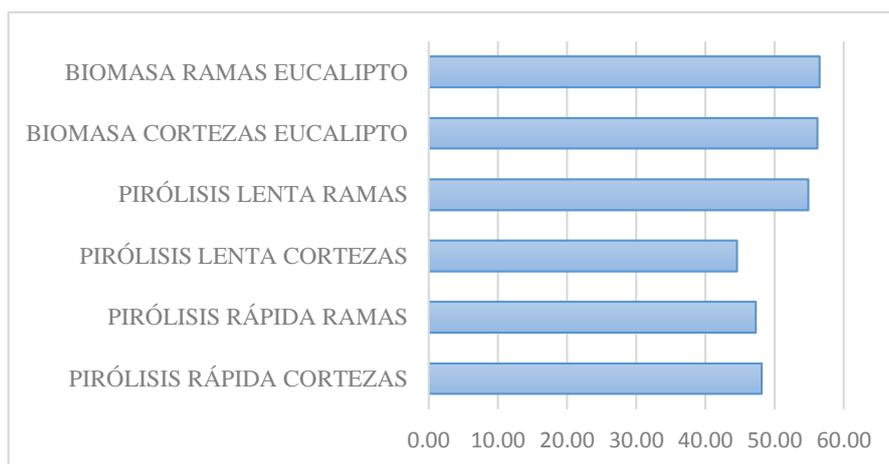


Figura 26: Porcentaje de carbono total para biomasa y biochar

Capacidad de intercambio catiónico CIC (meq/100 g).- De acuerdo a los datos expresados en la Figura 27, la capacidad de intercambio catiónico en el biochar es menor que en la biomasa, situación que se explica por el contenido de materia orgánica que existe en la biomasa.

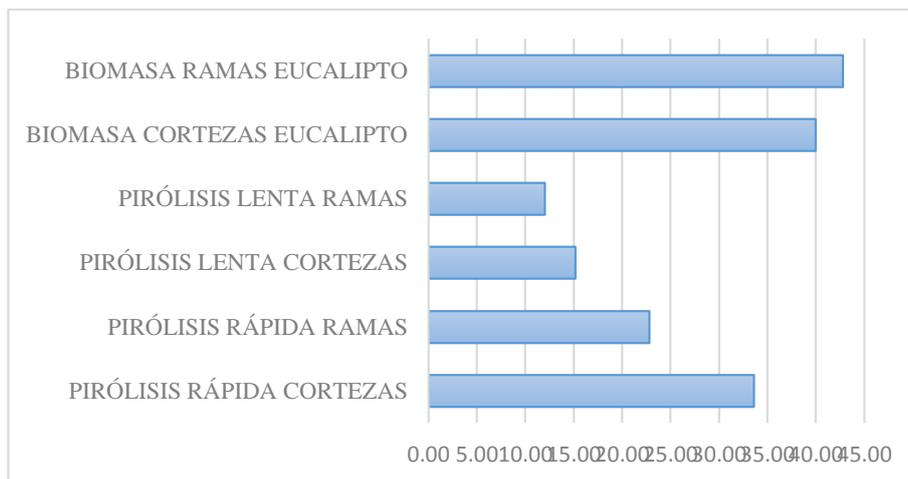


Figura 27: Capacidad de intercambio catiónico CIC (meq/100g)

Elementos disponibles (ppm).- Como se puede apreciar en la caracterización de la biomasa y el biochar, la cantidad de elementos disponibles, es mayor en la materia pirolizada que en la biomasa sin tratar, en lo que respecta a los microelementos, especialmente para hierro, zinc, cobre, manganeso y boro, razón por la que el biochar aporta con elementos que están disponibles para las plantas.

Por los resultados de las determinaciones obtenidas para el biochar y la biomasa sin tratar, se comprobó que en forma general, el proceso de pirólisis mejora las condiciones químicas de contenidos que pueden ser aprovechados por las plantas, frente a la biomasa sin tratamiento.

4.3.2. Análisis estadísticos de componentes principales para biomasa y biochar

La relación de los resultados y las muestras analizadas se expresan en la Figura 28. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 3.

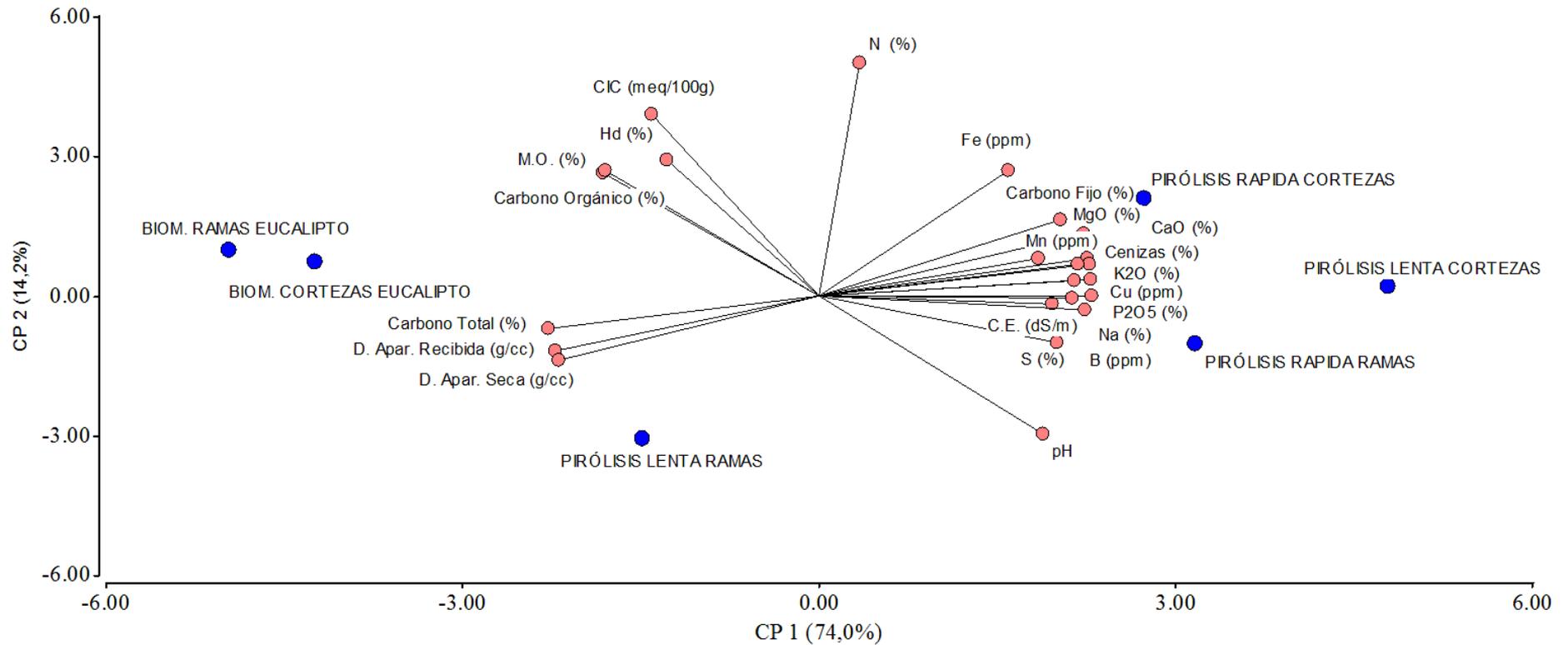


Figura 28: Análisis de componentes principales para biomasa y biochar

La interpretación de resultados, indica que la biomasa de eucalipto no guarda relación con el material pirolizado, lo que muestra el cambio en la estructura y composición del biochar por efecto de la pirólisis. El biochar obtenido por pirólisis rápida de cortezas (Pr-Cor), se relaciona con el Carbono fijo (%) y el MgO. El biochar obtenido con pirólisis lenta de cortezas (Pl-Cor), está relacionado con: Cenizas, Cu, K₂O y Na. La pirólisis rápida de ramas (Pr-Ram) se relaciona con CE, S y B. La biomasa de ramas (Biom. Ramas Eucalipto) y cortezas (Biom. Cortezas Eucalipto), no tendrían alguna caracterización particular.

4.3.3. Resultados de las pruebas de germinación

Las medidas iniciales de las diluciones en cuanto a pH y conductividad, se expresan en las Figuras 29 y 30 respectivamente.

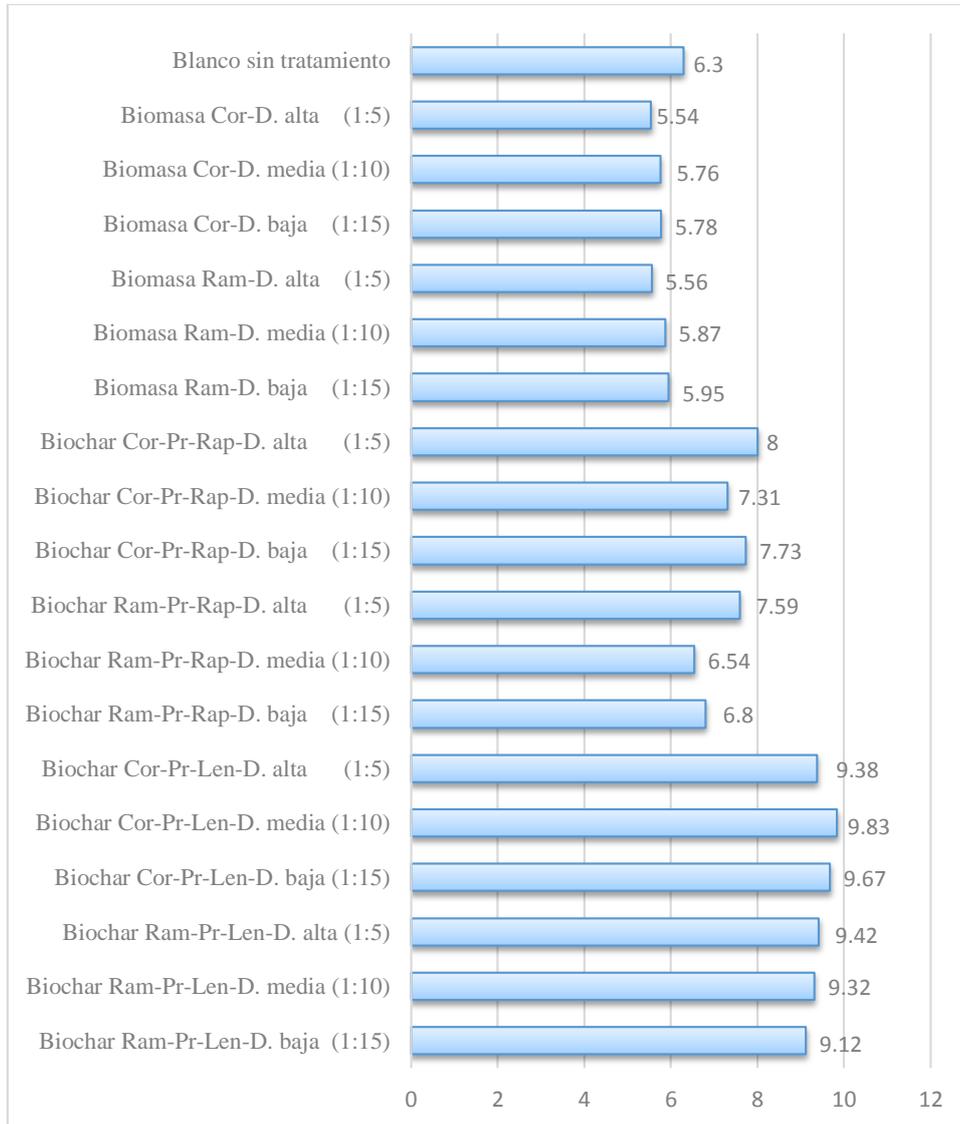


Figura 29: Potencia hidrógeno (pH) de las diluciones

Como se puede observar en la Figura 29 el pH de las diluciones con biochar, es más alto que el pH de la biomasa sin priorizar. Además con el biochar procesado mediante pirólisis lenta, se consigue niveles más altos de pH, debido a la mayor cantidad de ceniza, estos valores son coincidentes con lo reportado por Torres-Sallan *et al.* (2014) que refiere un pH de 8.5 para dilución 1:10 con biochar elaborado con biomasa de viñedos.

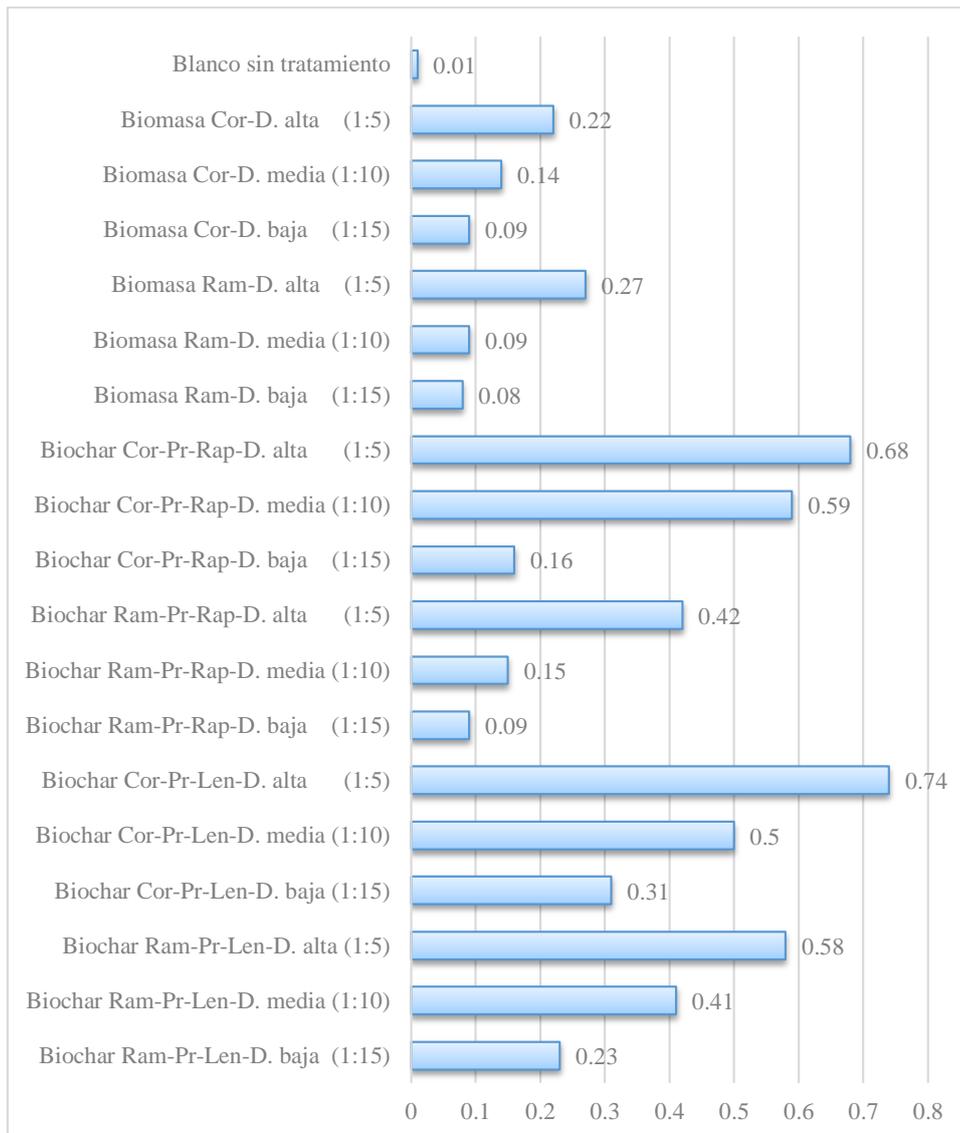


Figura 30: Conductividad eléctrica de las diluciones (mS/cm²)

Se puede analizar en la Figura 30 que el biochar de cortezas externas de eucalipto, presentó una mayor conductividad eléctrica, independientemente del método de pirólisis, esto demuestra la mayor cantidad de sales que están contenidas en el ritidoma del eucalipto.

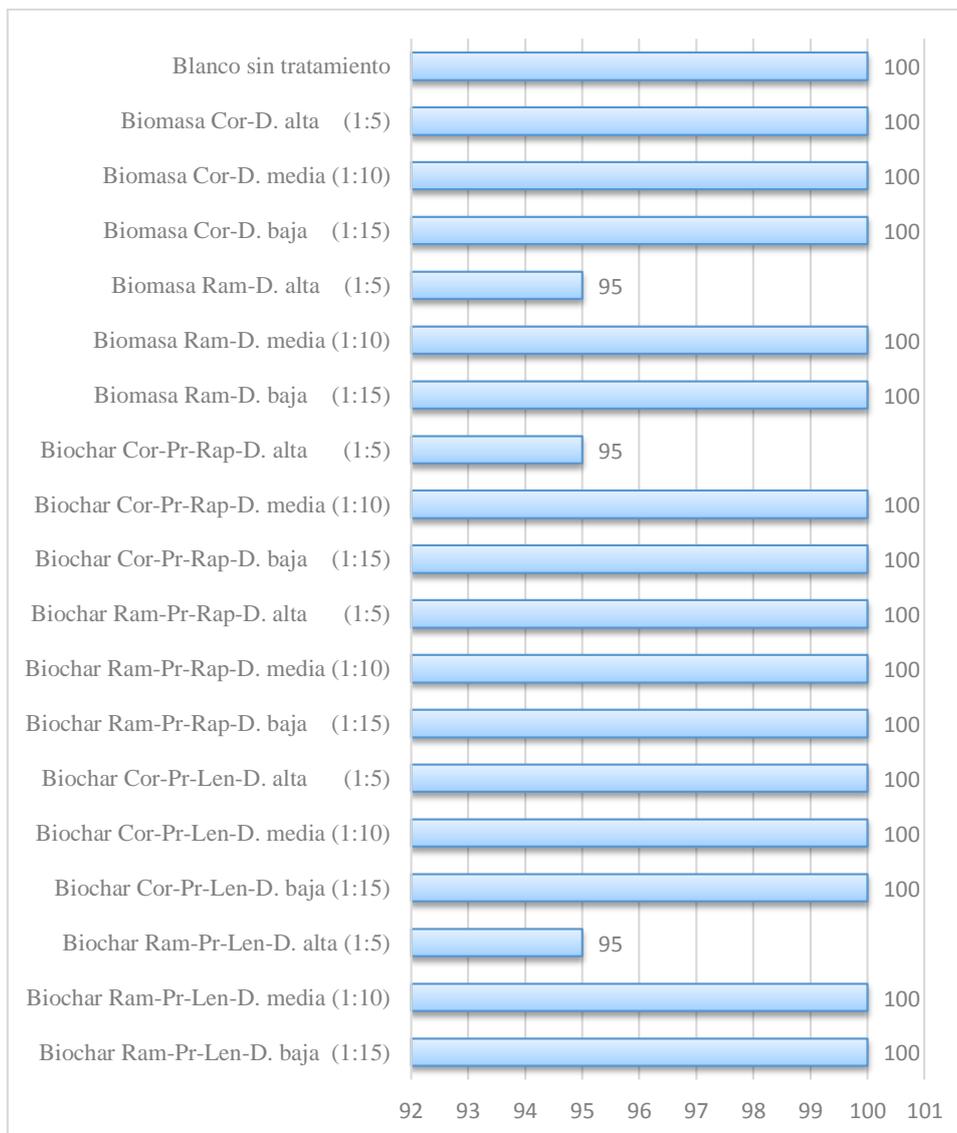


Figura 31: Total de germinación de radículas a las 60 horas

La germinación expresada en la Figura 31 muestra que los tratamientos con dosis alta de biochar no llegaron al cien por ciento de germinación de las semillas. Esta tendencia también es notoria en la evolución a las 24, 36 y 48 horas en que se tomaron los datos.

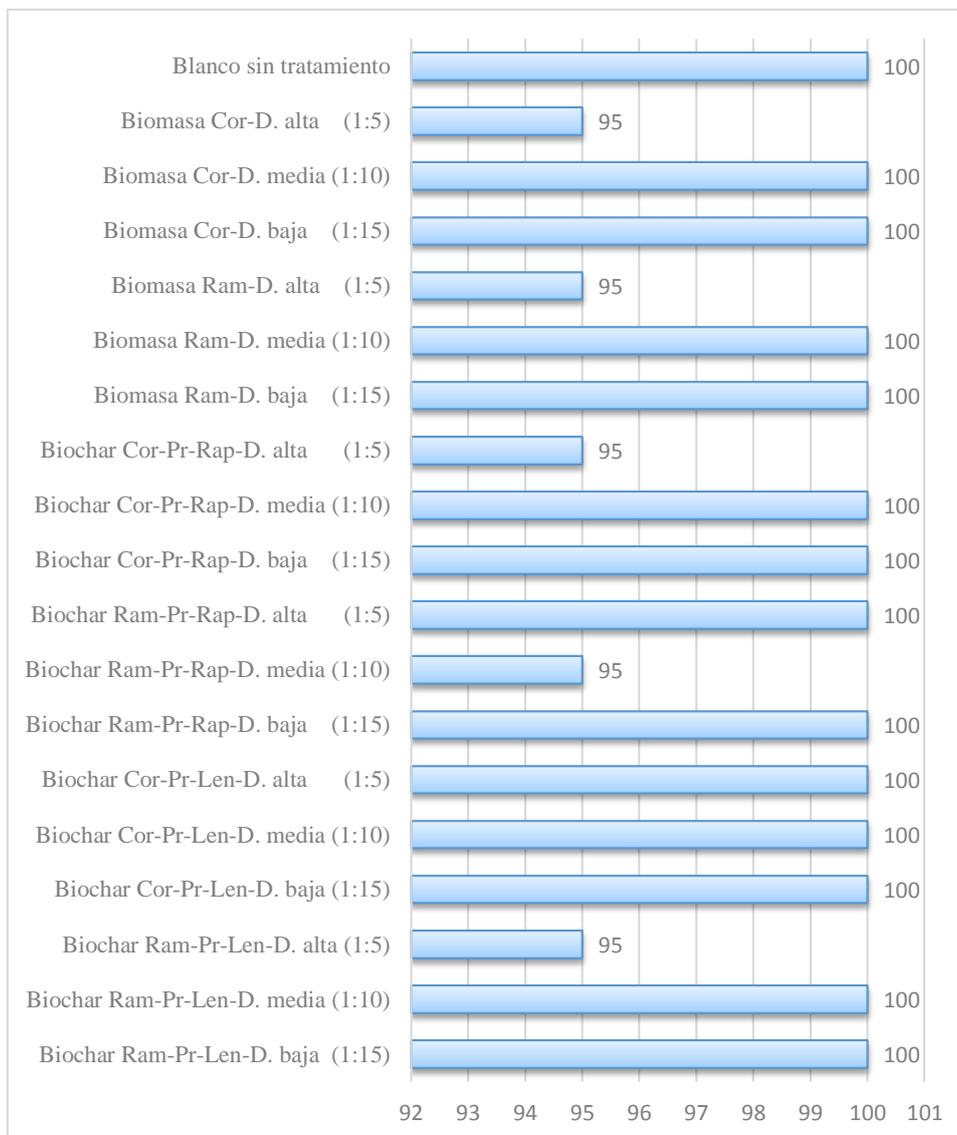


Figura 32: Total de germinación de gémulas a las 84 horas

Como se aprecia en la Figura 32 el brote de gémulas no alcanza la totalidad de germinación en los tratamientos expuestos a dosis altas de biochar, puesto que no llegaron al cien por ciento de germinación de las semillas. Esta tendencia también se observó en la evolución a las 60, 72 y 84 horas en que se tomaron los datos. Aspecto que también fue reportado en anteriores estudios de germinación (Viloria y Méndez, 2011).

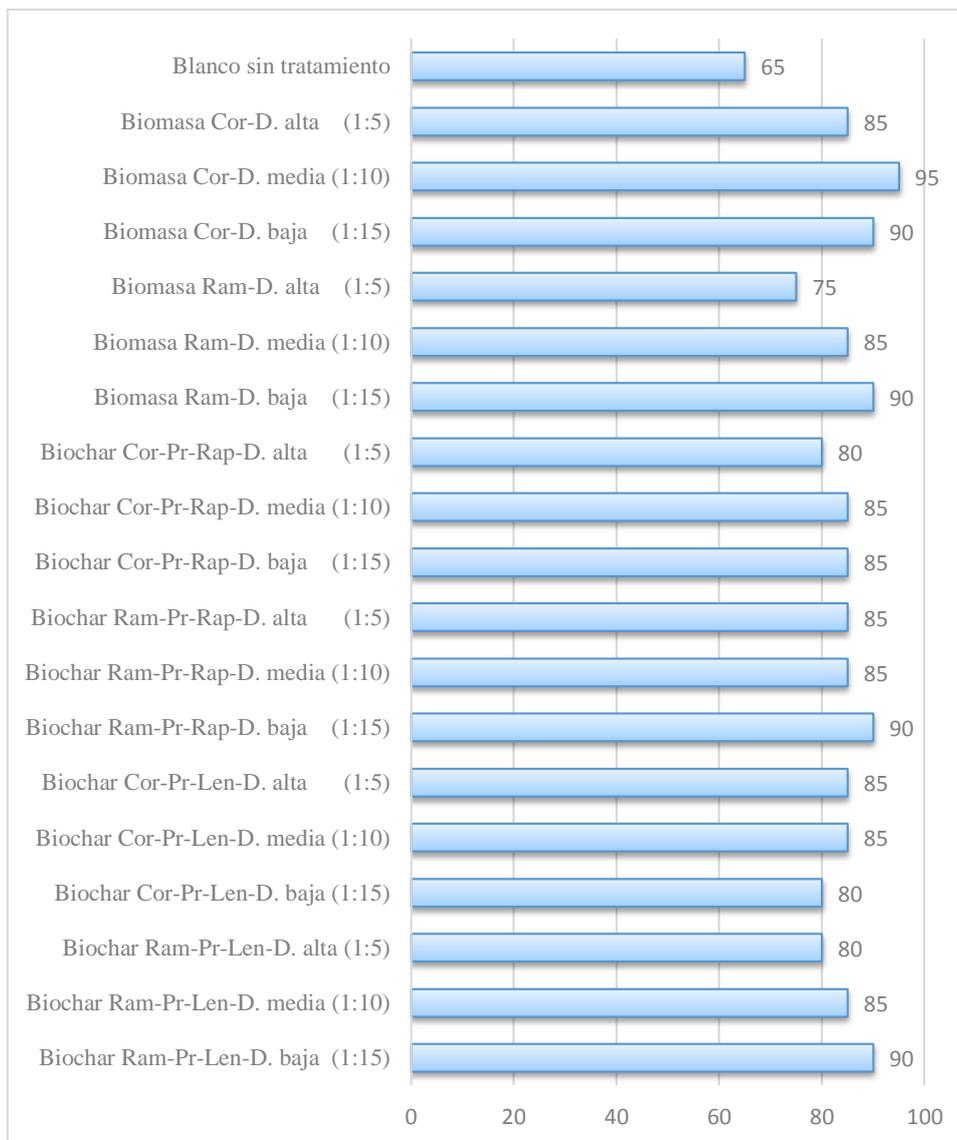


Figura 33: Crecimiento de plántulas hasta la valla de los siete cm

De acuerdo a la Figura 33 el desarrollo en altura de plántulas, muestra que los tratamientos con dosis altas de biochar no llegaron al cien por ciento de germinación de las semillas. Esta tendencia también se observó en la evolución medida en las valla de 3, 4 y 5 cm.

4.3.4. Determinación de la dosis a ser aplicada en campo

Del análisis en la germinación, se determinó que la dosis media de cinco toneladas por hectárea es la que logró mejores respuestas, en cuanto a brotes de radículas y crecimiento de gémulas del embrión de las semillas, por lo tanto se estableció como la dosis de aplicación más óptima para la validación en campo con el cultivo. El valor coincide con el estudio de biochar realizado en la Universidad de Valladolid España (Gilces Reyna, 2014).

Espinoza García (1996) probando la hojarasca de eucalipto en el suelo, da cuenta que aplicaron cuatro toneladas por hectárea de hojas secas de un eucalipto híbrido de (*Eucalyptus tereticornis*), en surcos durante la siembra a cultivos de trigo y maíz, determinando que los rendimientos fueron iguales o mayores que los obtenidos en suelo sin hojas de eucalipto.

Con estos valores se realizó el cálculo del material demandado para la siembra con los requerimientos por tratamiento y superficie de parcela, en razón de la dosis media de enmienda al suelo de cinco toneladas de biochar por hectárea. Estimación que fue referida también por (Khan *et al.*, 2015).

4.4. RENDIMIENTOS DEL CULTIVO DE MAÍZ CON BIOCHAR

OBJETIVO ESPECÍFICO.- Validar a nivel agronómico el comportamiento de los tipos de biochar, incorporado al suelo en el cultivo de maíz, para determinar la relación de sus propiedades potenciales sobre la productividad y el efecto en los suelos.

4.4.1. Rendimiento en peso de granos de mazorca (t ha⁻¹)

En el Cuadro 19 se muestran los rendimientos del maíz con sus medias ajustadas y errores estándares para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se exponen en el ANEXO 4.

Cuadro 19: Medias ajustadas y errores estándares para peso de grano seco

TRATAMIENTOS	MEDIAS (t ha ⁻¹)	E.E.	CLASE*
Pr-Cor+Ram	9.64	0.89	A
Pl-Cor	8.94	0.14	A
Pr-Cor	8.68	0.83	A
Pr-Ram	8.45	0.71	A
Pl-Cor+Ram	8.25	0.46	A
Pl-Ram	8.08	0.73	A
Fertilizado	7.71	0.86	A
Control	7.56	1.36	A

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Para el rendimiento del grano del maíz, no se encontró diferencias significativas ($p \leq 0,05$), sin embargo se pudo ver que la tendencia en general, fue de mayor producción para el

tratamiento Pr-Cor+Ram, seguido de los otros tratamientos, siendo superiores al tratamiento control que presentó los promedios más bajos de producción.

La mejor producción por el material de biochar de cortezas y ramas, se debe a que estos materiales generan un resultado de pirólisis más completo, cuando se unen estas dos estructuras forestales, el biochar producido presenta mejores características, como se observó en los análisis. También se puede ver que el mejor método de pirólisis expresado en rendimiento de maíz, es el rápido en horno de retorta, donde existe un mayor control de la temperatura.

Cuadro 20: Pruebas de hipótesis para contrastes de rendimiento entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor+Ram	-2.08	1.63	1.64	1	23	0.2136
Control vs Pl-Cor+Ram	-0.70	1.44	0.23	1	23	0.6326
Pl-Cor vs Pr-Cor	0.26	0.84	0.10	1	23	0.7591
Pr-Cor vs Pr-Ram	0.23	1.09	0.05	1	23	0.8313
Total			0.74	4	23	0.5768

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

En las pruebas no se encontró diferencias significativas para contrastes ($p \leq 0,05$). Los promedios obtenidos de rendimiento en mazorca para los tratamientos, fluctúan entre 7,56 y 9,64 t ha⁻¹ como se puede apreciar en la Figura 34.

Los cálculos para obtener los rendimientos de maíz, ajustados al 13 % de humedad (CIMMYT) se muestran en el ANEXO 5.

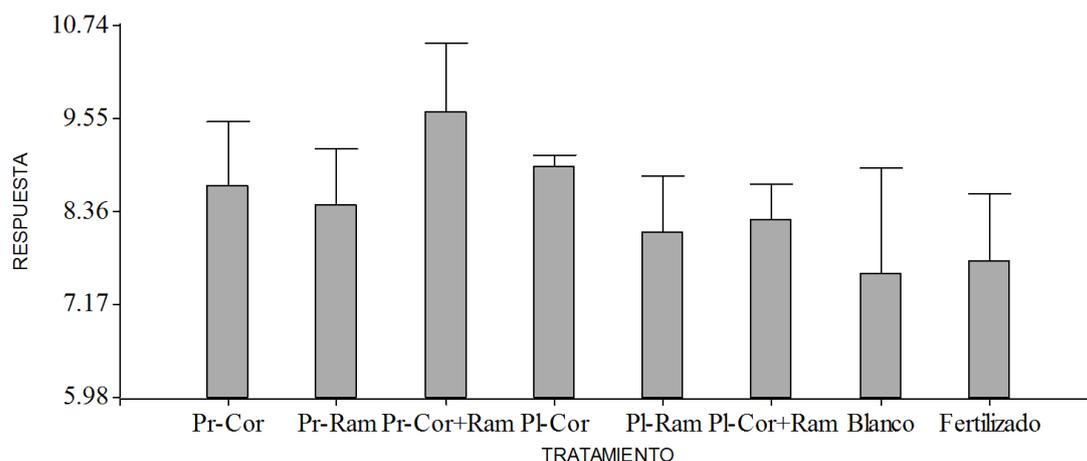


Figura 34: Medias de rendimiento para peso de grano seco (t ha⁻¹)

La variedad *Mishqui Sara*, se siembra también en el litoral del Ecuador, en el estudio realizado por Vera *et al.* (2013) con híbridos, reportó promedios de 7,0 t ha⁻¹, a 7,48 t ha⁻¹.

El INIAP en su registro de cultivares de maíz en Ecuador en localidades entre los 800 a 2.650 ms.n.m. obtiene promedios de rendimiento de 7,75 t ha⁻¹ (INIAP, 2010).

El INIA del Perú, para la variedad "INIA 620-WARI" maíz choclero de sierra, indica que tendría un rendimiento potencial de 5,2 t ha⁻¹ en grano seco (INIA, 2013).

El tratamiento fertilizado presento un bajo rendimiento, frente a los demás tratamientos con biochar, esto indica que las recomendaciones de fertilización del híbrido INIAP-103, tienen que ser ajustadas bajo diferentes condiciones, las mismas que pueden ser complementadas con fuentes alternas como el biochar.

4.4.2. Rendimiento en peso de choclo (t ha⁻¹)

En el Cuadro 21 se muestran los rendimientos del maíz cosechado en choclo con sus medias ajustadas y errores estándares para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 6.

Cuadro 21: Medias ajustadas y errores estándares para peso de grano seco

TRATAMIENTOS	MEDIAS (t ha ⁻¹)	E.E.	CLASE*	
Pl-Cor+Ram	17,70	0,99	A	
Pr-Cor	17,15	0,99	A	B
Pr-Cor+Ram	16,52	0,99	A	B
Control	16,13	1,15	A	B
Fertilizado	15,10	0,99	A	B
Pl-Cor	14,86	0,99	A	B
Pl-Ram	14,76	0,99		B
Pr-Ram	14,40	0,99		B

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Para el rendimiento en choclo, se pudo ver que la inferencia estadística de mayor producción fue para el tratamiento Pl-Cor+Ram, seguido de los tratamientos con pirólisis rápida, siendo superiores a los tratamientos control y fertilizado.

Los promedios obtenidos de rendimiento en choclo para los tratamientos, muestran una tendencia estadística favorable para los tratamientos con biochar elaborados a partir de

cortezas más ramas, a diferencia de los bichars elaborados únicamente con ramas. Esta situación también fue observada para el rendimiento en grano seco.

Cuadro 22: Pruebas de hipótesis para contrastes de rendimiento entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-CorRam	-0,39	1,52	0,07	1	23	0,8005
Control vs Pl-CorRam	-1,57	1,52	1,07	1	23	0,3118
P-ICor vs Pr-Cor	-2,30	1,41	2,66	1	23	0,1163
Pr-Cor vs Pr-Ram	2,76	1,41	3,84	1	23	0,0623
Total			1,41	4	23	0,2619

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Como se puede ver en las comparación Pr-Cor vs Pr-Ram, existe diferencia estadística, mostrada en el rendimiento entre los materiales usados para la pirólisis de la biomasa en horno.

Las medias de tratamientos de este estudio fluctúan entre 14,40 y 17.70 t ha⁻¹ como se puede apreciar en la Figura 35.

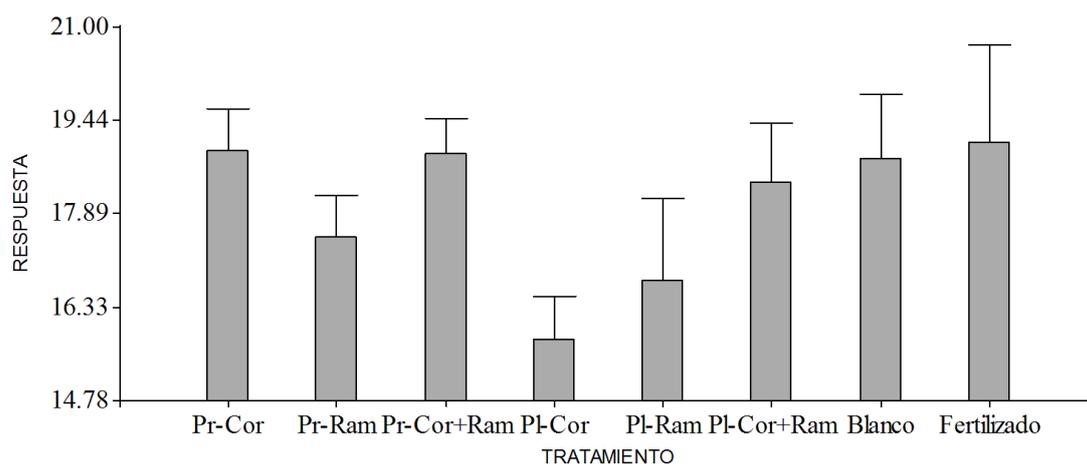


Figura 35: Medias de rendimiento para peso de choclo (t ha⁻¹)

En Ecuador, la Información técnica de la variedad *Mishqui Sara* (Datos promedio de localidades entre 40-2.650 ms.n.m.), reporta 15,75 t ha⁻¹ (350 sacos/ha). Los rendimientos para maíz INIAP-102 "Blanco Blandito Mejorado" están en 10.57 t ha⁻¹ (237 (sacos/ha). (INIAP, 2010).

En Perú los datos de la variedad “INIA 620 - *Wari* maíz choclero” estiman que su rendimiento como choclo, tiene un potencial de 8.8 t ha⁻¹ el promedio actual es 5.59 ha⁻¹ (INIA, 20013).

4.4.3. Índice de área foliar (IAF)

En el Cuadro 23 se muestran los promedios de índice de área foliar con sus medias ajustadas y errores estándares para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 7.

Cuadro 23: Medias ajustadas y errores estándares para IAF

TRATAMIENTOS	MEDIAS (IAF)	E.E.	CLASE*	
Pr-Ram	5,11	0,29	A	
Fertilizado	5,06	0,29	A	B
Pr-Cor	5,03	0,29	A	B
Pr-Cor+Ram	5,02	0,29	A	B
Pl-Ram	4,74	0,29	A	B
Pl-Cor+Ram	4,61	0,29	A	B
Control	4,49	0,33	A	B
Pl-Cor	4,26	0,29		B

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Se observa diferencia estadística y los tratamientos con mayor IAF fueron los que incorporaron biochar producido con el método de pirólisis rápida (en horno de retorta), esto significa una mejor fotosíntesis y metabolismo en la nutrición de las plantas. Una de las mejores respuestas para IAF se dio también para el tratamiento con fertilización completa y que no se dio con la respuesta a los rendimientos de grano. Esta situación nos dice que se necesita tener una mejor combinación de los fertilizantes inorgánicos con los orgánicos a base de biochar para obtener un mayor balance nutricional y mejores rendimientos.

Cuadro 24: Pruebas de hipótesis para contrastes de IAF entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor Ram	-0,53	0,44	1,43	1	23	0,2438
Control vs Pl-Cor Ram	-0,12	0,44	0,07	1	23	0,7900
Pl-Cor vs Pr-Cor	-0,77	0,41	3,56	1	23	0,0720
Pr-Cor vs Pr-Ram	-0,08	0,41	0,04	1	23	0,8468
Total			1,74	4	23	0,1750

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

No se encontró diferencias significativas para contrastes del IAF ($p \leq 0,05$). Para la comparación en materia prima de cortezas, se nota alguna diferencia con el método de pirólisis, debido a la mayor sensibilidad de la corteza a la temperatura. Los valores del índice de área foliar, por tratamiento varían entre 4,26 y 5,11 como se aprecia en la Figura 36.

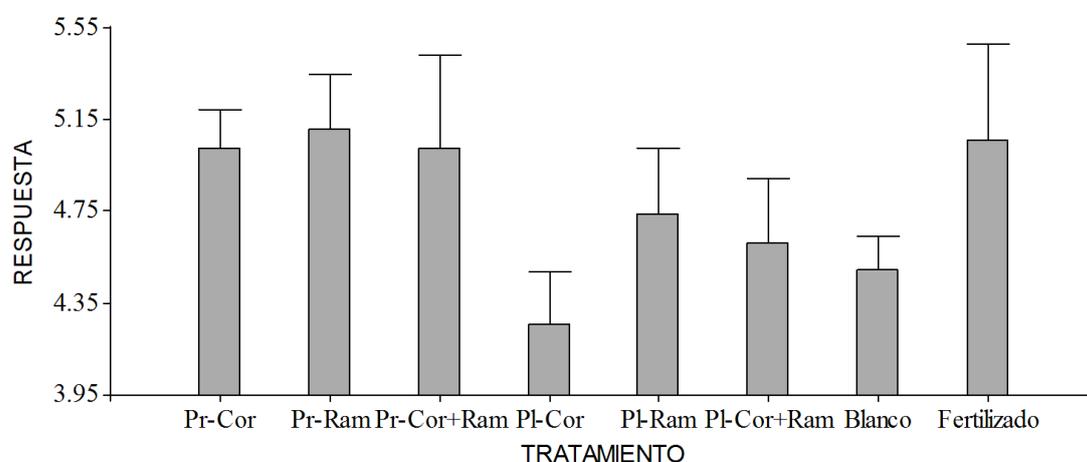


Figura 36: Medias del índice de área foliar

Los hallazgos son coincidentes con el estudio de caracterización de nueve genotipos de maíz, en relación al área foliar y coeficiente de extinción de luz, donde se reporta IAF con valores de 4,26 a 6,67 (Camacho *et al.*, 1995).

En Perú, el estudio análisis de crecimiento en *Zea mays* L. y *Arachis hypogaea* L, refiere índices de área foliar óptima de 5,59 (Soplín *et al.*, 1993).

Para el IAF el tratamiento fertilizado mejora, en comparación con el análisis de rendimiento en grano seco, lo que indicó que la fertilización recomendada para la variedad, estaría propiciando mayoritariamente, el desarrollo de la parte aérea de la planta de maíz.

4.4.4. Peso de biomasa en materia seca (MS) (t ha⁻¹)

En el Cuadro 25 se muestra el peso de biomasa MS con sus medias ajustadas y errores estándares para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 8.

Cuadro 25: Medias ajustadas y errores estándares para peso de biomasa MS

TRATAMIENTOS	MEDIAS (t ha ⁻¹)	E.E.	CLASE*	
Fertilizado	19,08	1,02	A	
Pr-Cor	18,94	1,02	A	
Pr-Cor+Ram	18,89	1,02	A	
Control	18,80	1,17	A	B
Pl-Cor+Ram	18,42	1,02	A	B
Pr-Ram	17,49	1,02	A	B
Pl-Ram	16,78	1,02	A	B
Pl-Cor	15,78	1,02		B

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Se encontró diferencia estadística en MS, para los tratamientos donde se aplicó biochar producido con pirólisis rápida (con mejor control de temperatura), los cuales propician la formación de biomasa. También se puede deducir que la pirólisis lenta, no es determinante en los resultados de biomasa.

Para la producción de forraje analizado como MS, con la variedad *Mishqui Sara*, tiene fuerte efecto el tratamiento fertilizado, debido a la acción del nitrógeno en la formación de biomasa, corroborando lo encontrado en el análisis del IAF.

La producción de mayor cantidad de biomasa, potencializada con alternativas a la fertilización química tradicional, como el uso de biochar, tiene asidero entre los ganaderos, debido a que en la región austral se está empezando a utilizar maíz para forraje verde y ensilaje, debido a la creciente actividad ganadera principalmente con razas de vacunos para la producción de lácteos.

El Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay, indica que el 30,89 % de la superficie del territorio (262338,62 ha) tienen aptitud para la producción ganadera, sin embargo la misma debe ser llevada a cabo técnicamente con el objetivo de mejorar la producción, debido a las limitaciones de uso para este tipo de coberturas.

Cuadro 26: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor Ram	-0,09	1,55	3,4E-03	1	23	0,9538
Control vs Pl-Cor Ram	0,38	1,55	0,06	1	23	0,8079
Pl-Cor vs Pr-Cor	-3,16	1,44	4,82	1	23	0,0384
Pr-Cor vs Pr-Ram	1,45	1,44	1,02	1	23	0,3233
Total			1,24	4	23	0,3224

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

En este caso se encontró diferencia significativa para contrastes ($p \leq 0,05$) en la comparación Pl-Cor vs Pr-Cor, donde se hacen presentes diferencias para la producción de biomasa del maíz con el método de pirólisis del biochar. Este efecto se debe a la mayor sensibilidad de la corteza del eucalipto a la temperatura y cuya respuesta se observó también en el análisis de contrastes para el índice de área foliar.

Los promedios de rendimiento en biomasa (utilizado para forraje), cosechada cuando el fruto está en estado pastoso, expresada en materia seca varían entre 15,78 y 19,08 t ha⁻¹ como se aprecia en la Figura 37.

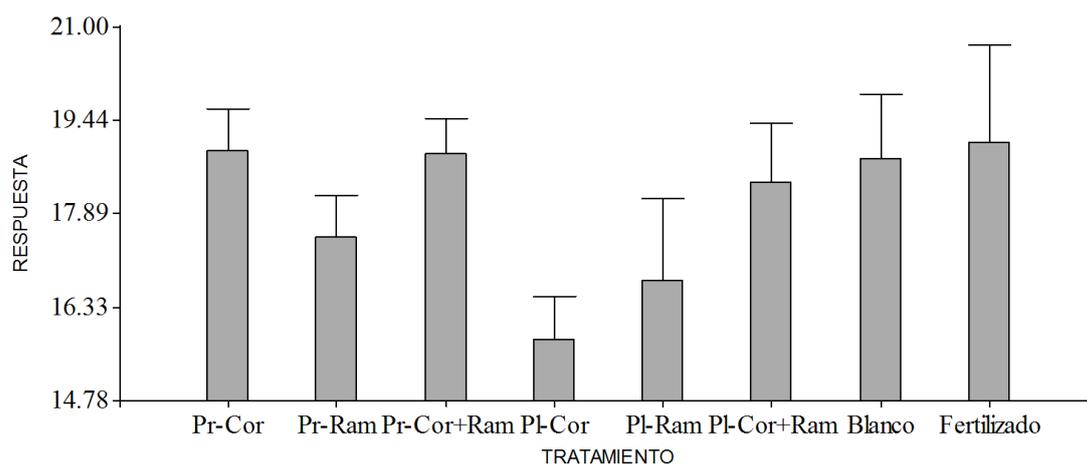


Figura 37: Medias de rendimiento para peso de biomasa MS (t ha-1)

Las medias de peso de biomasa (MS), tienen relación con el estudio realizado en el valle del Sinú medio en Colombia, para genotipos de *Zea mays* con fines forrajeros, que refieren valores de materia seca de 13,71 a 22,11 t ha⁻¹ (Cabralés *et al.*, 2007).

En México el paquete tecnológico para la producción de maíz forrajero en Chihuahua, documenta rendimientos en materia seca de 12 a 20 t ha⁻¹ (Jurado *et al.*, 2014).

En Argentina el estudio de rendimiento y calidad de maíz forrajero *Zea mays* con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas, originó rendimientos en materia seca de 12,31 a 15,14 t ha⁻¹ (Yescas *et al.*, 2015).

4.4.5. Altura de plantas (m)

En el Cuadro 27 se muestra las alturas alcanzadas por las plantas de maíz con sus medias ajustadas y errores estándar para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 9.

Cuadro 27: Medias ajustadas y errores estándares para altura de plantas

TRATAMIENTOS	MEDIAS (m)	E.E.	CLASE*	
Pr-Ram	2.67	0.07	A	
Pr-Cor	2.61	0.03	A	B
Fertilizado	2.60	0.15	A	B
Pr-Cor+Ram	2.59	0.05	A	B
Pl-Cor+Ram	2.59	0.06	A	B
Pl-Cor	2.51	0.05	A	B
Control	2.37	0.05	B	
Pl-Ram	2.31	0.15	B	

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Para la altura de planta, se pudo ver que la tendencia en general fue mayor para los tratamientos con pirólisis rápida, seguido del tratamiento fertilizado. Estos resultados son coincidentes con los encontrados en los análisis anteriores de índice de área foliar y biomasa. Para la altura sobresalen notoriamente los tratamientos que tienen biochar elaborado en horno de retorta donde hay mejor control de temperatura.

Cuadro 28: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor Ram	-0,22	0,07	10,04	1	23	0,0043
Control vs Pl-Cor Ram	-0,22	0,07	9,22	1	23	0,0059
Pl-Cor vs Pr-Cor	-0,10	0,06	3,01	1	23	0,0960
Pr-Cor vs Pr-Ram	-0,06	0,08	0,60	1	23	0,4456
Total			4,47	4	23	0,0081

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Para este análisis se encontró diferencia significativa para contrastes ($p \leq 0,05$) en las comparaciones Control vs Pr-Cor Ram y en Control vs Pl-Cor Ram, donde se hacen presentes diferencias para la altura del maíz. Las pruebas de hipótesis para alturas demuestran diferencias cuando se usa materia prima de cortezas más ramas.

Los promedios de altura de planta varían entre 2,31 y 2,67 m, como se aprecia en la Figura 38.

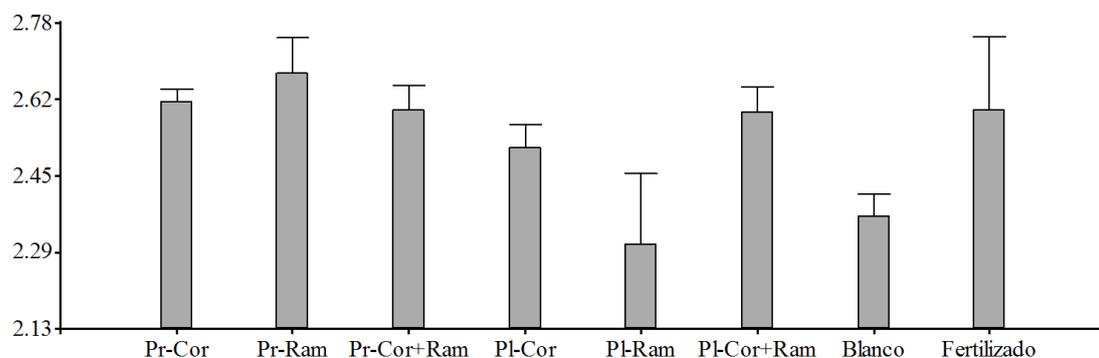


Figura 38: Medias de altura de planta (m)

En Ecuador la información técnica de la variedad “*Mishqui Sara*” (datos promedio de localidades entre 40-2.650 ms.n.m.), registra una altura de plantas promedio de 2,50 m (INIAP, 2010).

4.4.6. Diámetro de tallos (cm)

En el Cuadro 29 se muestra los diámetros alcanzados por las plantas de maíz con sus medias ajustadas y errores estándar para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 9.

Cuadro 29: Medias ajustadas y errores estándares para diámetro de tallos

TRATAMIENTOS	MEDIAS (cm)	E.E.	CLASE*
Pr-Cor	1.91	0.09	A
Pr-Cor+Ram	1.90	0.11	A
Pr-Ram	1.90	0.06	A
Fertilizado	1.89	0.09	A
Pl-Ram	1.85	0.08	A
Pl-Cor+Ram	1.78	0.11	A
Control	1.75	0.06	A
Pl-Cor	1.70	0.08	A

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Los tratamientos con biochar con pirólisis rápida son los que alcanzan los mejores diámetros. El tratamiento con pirólisis lenta de cortezas no aporta al desarrollo del tallo.

El diámetro del tallo es un factor fisiológico muy importante, debido a que un tallo más grueso, puede resistir mejor la influencia del viento y también disminuye el acame de las plantas por el peso de los choclos.

Cuadro 30: Pruebas de hipótesis para contrastes de biomasa entre los diferentes tratamientos

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor Ram	-0,15	0,12	10,04	1	23	0,2267
Control vs Pl-Cor Ram	-0,02	0,13	9,22	1	23	0,8453
Pl-Cor vs Pr-Cor	-0,21	0,12	3,01	1	23	0,0803
Pr-Cor vs Pr-Ram	0,01	0,11	0,60	1	23	0,9078
Total			4,47	4	23	0,2167

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

No se encontró diferencia significativa para contrastes ($p \leq 0,05$), sin embargo en la comparación Pl-Cor vs Pr-Cor, se nota la tendencia de diferencias entre los métodos de pirólisis.

Los promedios del diámetro por tratamiento varían entre 1,70 y 1,91 cm; como se aprecia en la Figura 39.

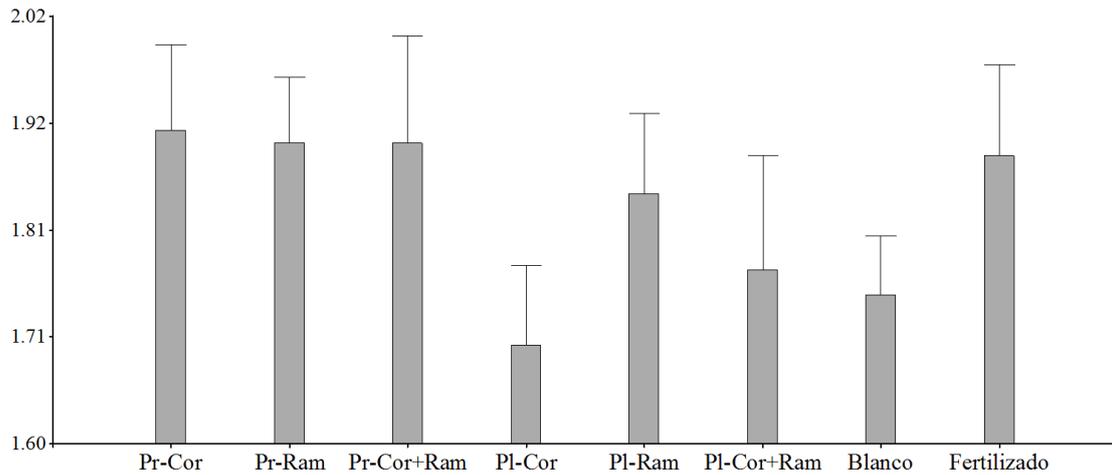


Figura 39: Medias de diámetro de tallo (cm)

4.4.7. Contenido de macromelementos (N-P-K) del grano

En la Figura 40 se puede observar la relación de los elementos nitrógeno, fósforo y potasio del grano, en los tratamientos estudiados con el análisis por componentes principales. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 10.

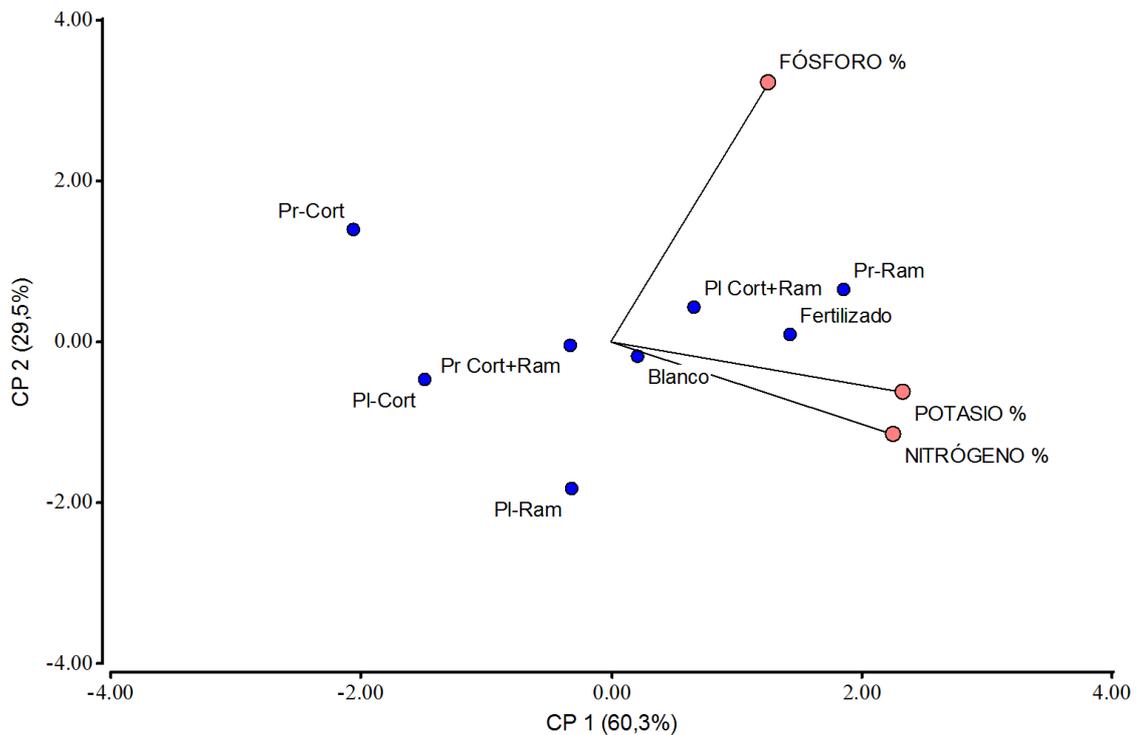


Figura 40: Análisis de componentes principales para nitrógeno, fósforo y potasio.

El análisis de los porcentajes para N-P-K y los tratamientos, muestra que el contenido de nitrógeno estaría más relacionado con el potasio, esto se explicaría porque los aminoácidos de las proteínas tienen nitrógeno en su estructura y por la acción celular del potasio.

El fósforo que contiene el grano, no se relaciona directamente con el potasio y nitrógeno. El potasio estaría más relacionado al tratamiento fertilizado.

Los tratamientos de siembra con biochar Pr-Ram y Pr-Cor, estarían inversamente relacionados al contenido de nitrógeno y potasio del fruto.

4.4.8. Análisis de proteína en el grano del maíz

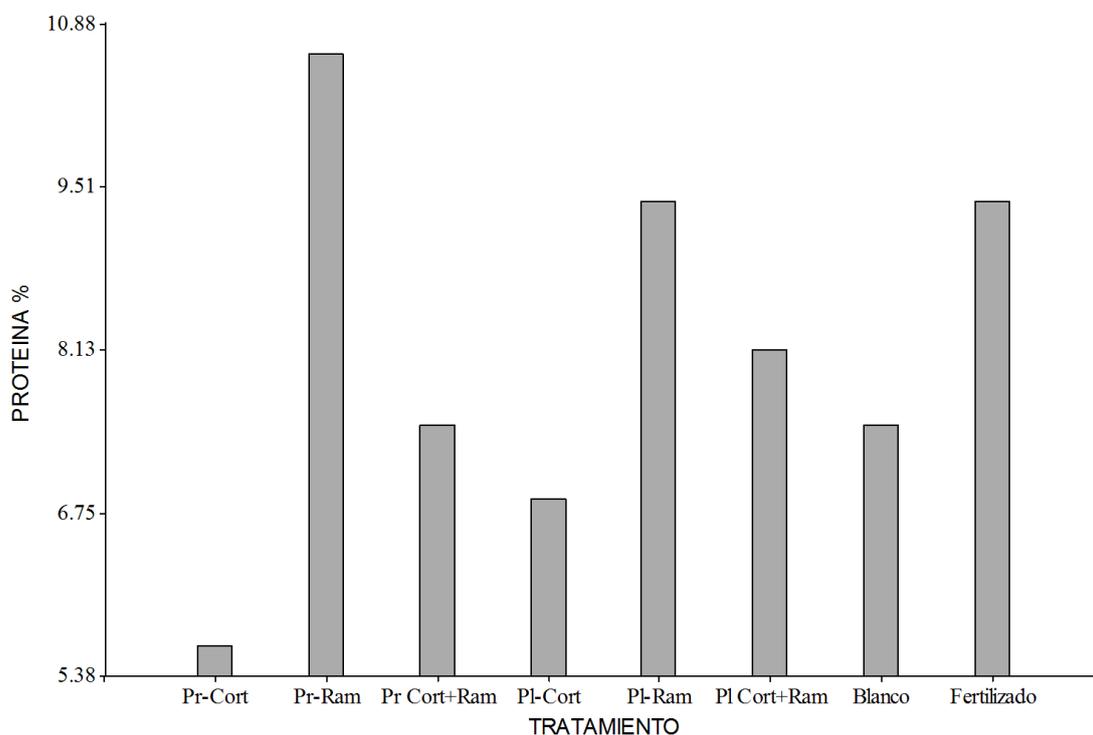


Figura 41: Análisis de porcentaje de proteína en grano.

El tratamiento donde se aplicó biochar elaborado por el método de pirólisis rápida con biomasa residual de ramas, alcanzó los mejores niveles de proteína en grano, incluso superando a los niveles de proteína del tratamiento fertilizado. Esta situación mostró que el biochar puede potencializar la proporción de proteína en el grano de maíz.

La variedad INIAP-103 “*Mishqui Sara*” Maíz Nutritivo, evaluada en este estudio, se promociona como rica en proteína, debido a que posee mayor cantidad de aminoácidos como triptófano y lisina que otras variedades del INIAP.

El tratamiento fertilizado estuvo influenciando directamente en la calidad del grano en cuanto a proteína, con el aporte del fertilizante 10-30-10 y la urea.

4.4.9. Análisis de suelos de los tratamientos

El análisis químico del suelo, considerado un aspecto fundamental de la investigación, tuvo como propósito establecer las diferencias que existen en los suelos con la aplicación de los distintos tratamientos de biochar.

Todos los estudios de suelos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina en Lima Perú.

Con los resultados del análisis, se pudo también establecer la respuesta del biochar en el suelo luego del ciclo completo del cultivo del maíz, mediante la comparación de los parámetros antes y después del de la cosecha.

Se analizaron estadísticamente los principales componentes químicos del suelo por tratamientos como: carbono retenido, niveles de pH, porcentaje nitrógeno, porcentaje de fósforo, etc.

Estos datos se han obtenido a partir del análisis de la caracterización del suelo realizada para cada uno de los tratamientos con biochar luego de la cosecha final del maíz en mazorca, los mismos se realizaron en todos los tratamientos, se comparó con una línea base de partida, que fue el análisis del suelo antes del cultivo del maíz. Los valores obtenidos en los análisis se expresan en el Cuadro 31. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 12.

Cuadro 31: Caracterización del suelo en los diferentes tratamientos

TRATAM.	RESPUESTA													
	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	Carbono Reten. (t ha ⁻¹)	COT %	N %	P (ppm)	K (ppm)	CIC	B (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)
Biochar Pirólisis Rápida Cortezas	7,87	0,28	1,3	51,745	1,39	0,14	13,6	451	26,88	1,19	4,7	7,4	6,6	2,1
Biochar Pirólisis Rápida Ramas	8,04	0,27	1	67,044	1,6	0,15	12,3	434	32,32	1,28	4,7	7,6	8,3	1,8
Biochar Pirólisis Ráp. Cor+Ram	8,14	0,24	1,1	45,787	1,37	0,14	15	446	32	1,09	4,85	7,4	6,8	2
Biochar Pirólisis Lenta Cortezas	8,04	0,28	1,1	69,630	1,78	0,16	14	454	34,08	1,25	4,6	8,2	6,5	2,2
Biochar Pirólisis Lenta Ramas	8,06	0,28	1	58,747	1,58	0,17	14,2	486	32	1,84	4,7	8	6,6	2,4
Biochar Pirólisis Lenta Cor+Ram	8,03	0,3	1,1	52,350	1,6	0,15	15,1	441	30,72	1,19	4,55	8,35	6,85	1,85
Blanco/Control	8,05	0,29	1	56,873	1,54	0,15	11	341	32	1,44	4,5	7,4	5,5	2
Fertilizado	8,01	0,28	1	59,487	1,73	0,13	26,4	359	32,8	1,51	4,4	7,6	4,2	1,8
Suelo antes del cultivo	7,74	0,94	1,1	52,493	1,53	0,085	13,7	456	33,4	2,45	3,9	5,22	4,4	1,4

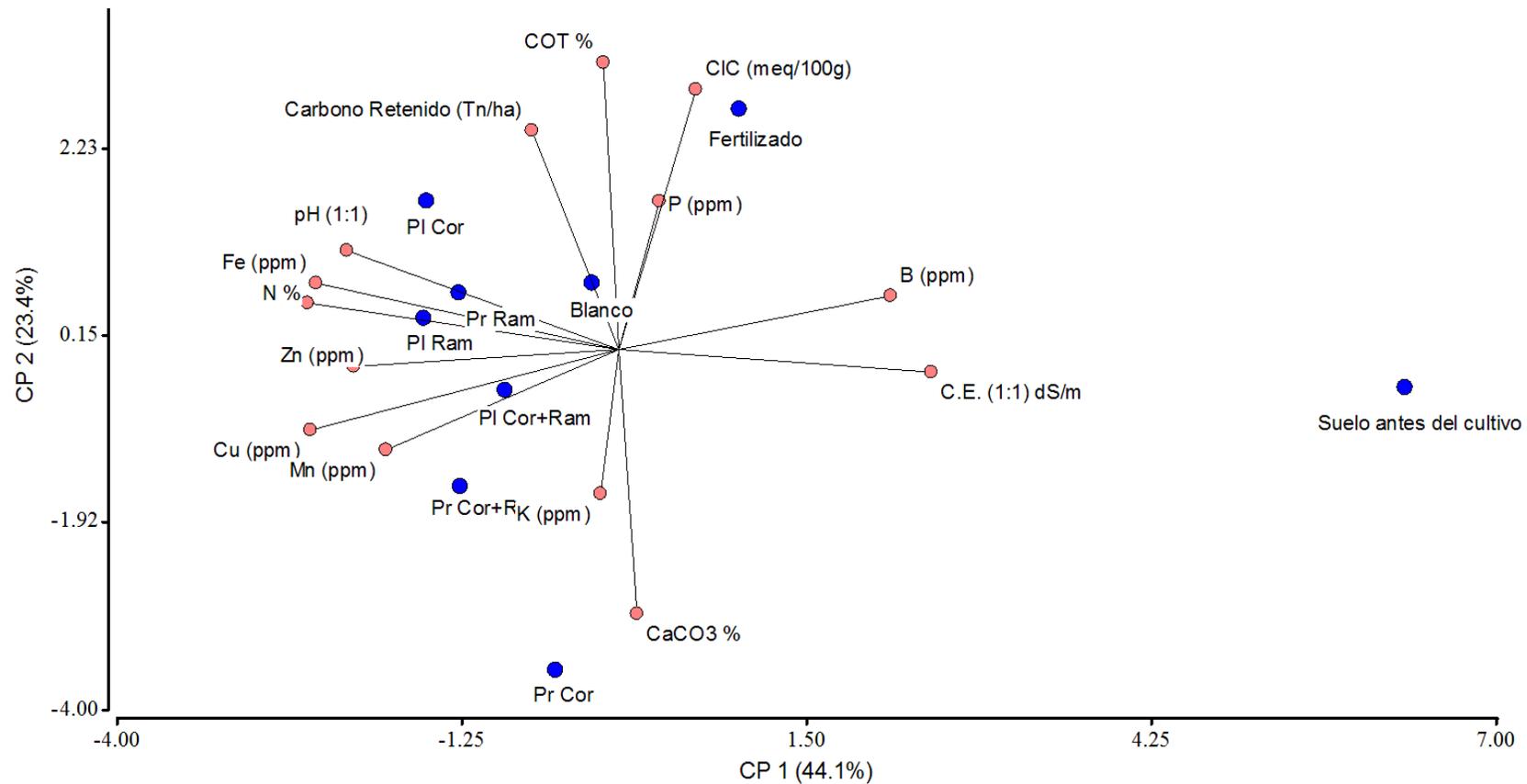


Figura 42: Análisis de componentes principales del suelo para tratamientos

El análisis de componentes principales, muestra que las condiciones generales del suelo en cuanto a nutrientes, cambian notoriamente con los tratamientos de biochar, respecto al tratamiento suelo antes del cultivo. Los tratamientos PI Cor, Pr Ram, y PI Ram son caracterizados por pH, Fe, y, N%. En tanto que PI Cor+Ram y Pr Cor+Ram los caracteriza Cu, Mn. Al tratamiento fertilizado lo caracteriza la CIC y el P.

Carbono retenido en el suelo

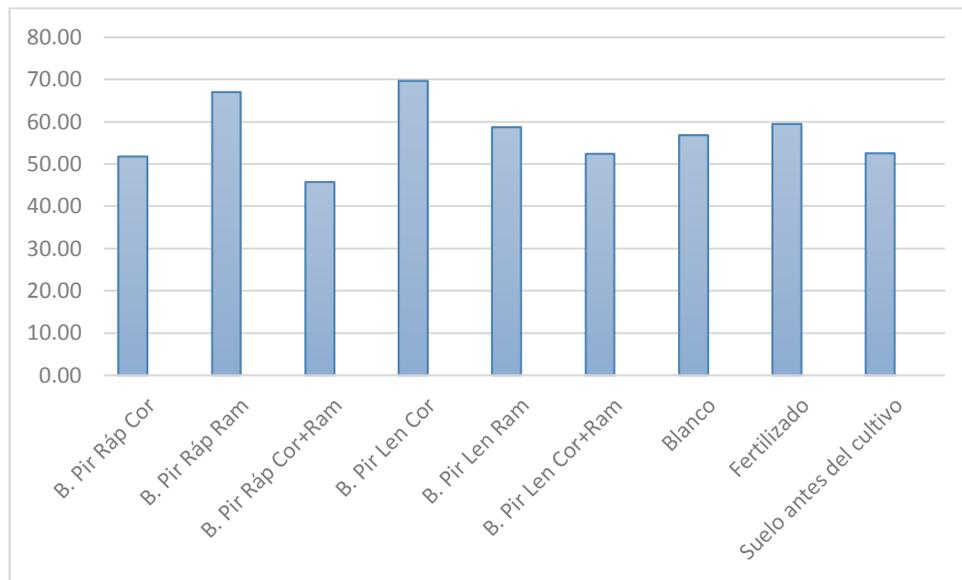


Figura 43: Carbono retenido en el suelo por tratamiento (t ha⁻¹)

De acuerdo al análisis de la Figura 43, se pudo establecer que los suelos de tratamientos donde se incorporó biochar, tenían mejores niveles de carbón retenido. Los valores alcanzados varían de 52,35 a 69,63 t ha⁻¹ de carbón.

La investigación realizada en Tailandia sobre efectos del biochar de *Eucalyptus camaldulensis* en la producción del suelo y secuestro de carbono, con dosis de aplicación de 6,25 t ha⁻¹ refiere cantidades de carbón de 12,88 a 28,81 t ha⁻¹ (Thammasom *et al.*, 2016).

Niveles de pH en el suelo

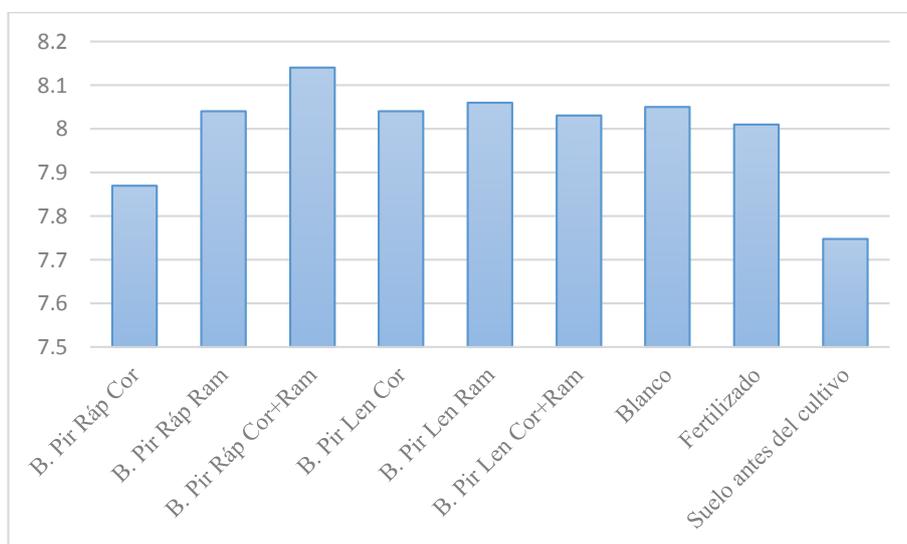


Figura 44: Niveles de pH en suelo por tratamiento

Los valores de pH después del ciclo de cultivo, expresados en la Figura 44, muestran el incremento de este indicador en los tratamientos que tuvieron biochar, sobre los valores de pH antes del cultivo. Esta condición confirma lo encontrado en el análisis de biochar y en las diluciones para las pruebas de germinación.

En el trabajo sobre biochar de *Eucalyptus camaldulensis* en la producción del suelo y secuestro de carbono en Tailandia, con dosis de 6,25 t ha⁻¹ refiere un pH en suelo de 7,98 (Thammasom *et al.*, 2016).

La investigación en suelo forestal con aplicación de biochar en Ontario Canadá, dio resultados de pH 7.7 (Sackett *et al.*, 2015).

Nitrógeno en el suelo

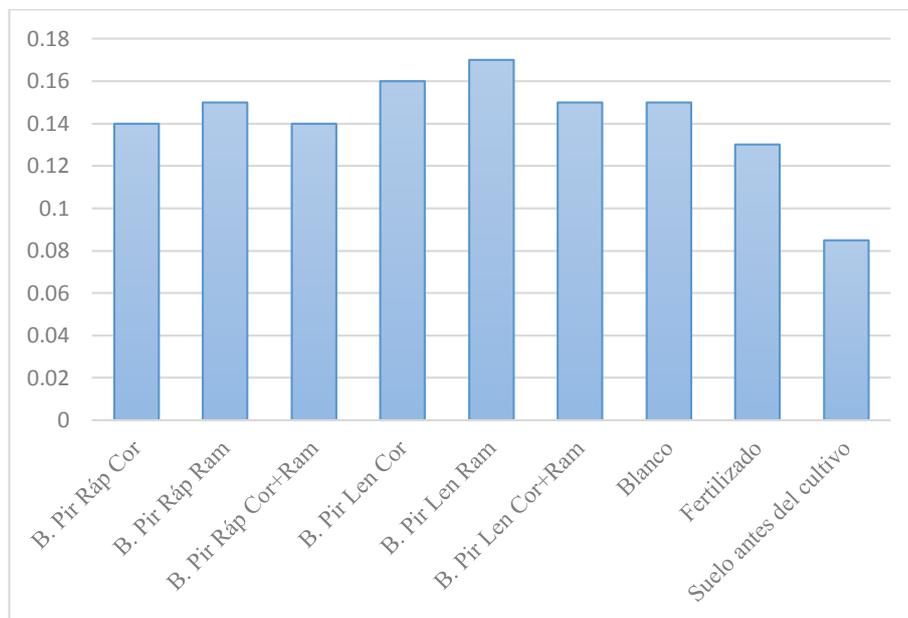


Figura 45: Porcentaje de nitrógeno en los tratamientos

Como se aprecia en la Figura 45, la disponibilidad de nitrógeno en el suelo se incrementa en los tratamientos que tienen biochar producido en horno.

Fósforo en el suelo

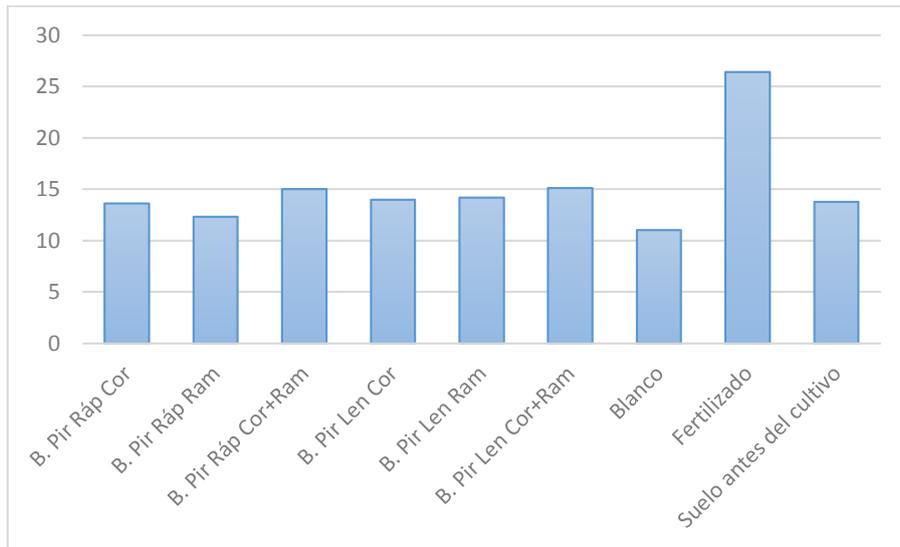


Figura 46: Contenido de fósforo en los tratamientos

De acuerdo a la Figura 46 para el contenido de fósforo en suelo, destaca el tratamiento fertilizado sobre los demás ya que el aporte de P con el biochar de los materiales vegetales tiene bajos contenidos del elemento y usualmente gran parte del fósforo es traslocado a la semilla.

4.4.10. Densidad aparente y porosidad del suelo

Los efectos del biochar en la densidad en el suelo, fueron evaluados por el método de los cilindros y se expresan en el Cuadro 32, con sus medias ajustadas y errores estándar para los diferentes tratamientos. Los resultados del modelo estadístico se muestran en el ANEXO 13.

Cuadro 32: Medias ajustadas y errores estándares para densidad aparente

TRATAMIENTOS	MEDIAS	E.E.	CLASE*
PL-Cor+Ram	1.62	0.04	A
Pr-Cor+Ram	1.60	0.06	A B
Pr-Ram	1.49	0.04	A B
PL-Ram	1.49	0.05	A B
Pr-Cor	1.48	0.04	B
Fertilizado	1.44	0.05	B C
PL-Cor	1.34	0.03	C D
Control	1.28	0.03	D E
Antes del cultivo	1.20	0.03	E

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

Para la densidad de los suelos en los diferentes tratamientos, se encontró altas diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Como se puede observar, la aplicación de biochar, incrementa la densidad del suelo después del cultivo de maíz y esto significa una menor porosidad si se compara con el control que presentó la menor DA y una mayor porosidad.

El tratamiento PL-Cor, presentó una DA de 1,34 que es un valor óptimo y permite mantener una buena porosidad.

Cuadro 33: Pruebas de hipótesis para contrastes de densidad aparente

TRATAMIENTO	CONTRASTE	E.E.	F	gl(num)	gl(den)	p-valor
Control vs Pr-Cor+ Ram	-0,32	0,07	20,7	1	27	0,0001
Control vs Pl-Cor+ Ram	-0,34	0,05	43,6	1	27	<0,0001
Pl-Cor vs Pr-Cor	0,13	0,05	7,2	1	27	0,0124
Pr-Cor vs Pr-Ram	-0,02	0,06	0,09	1	27	0,7663
Total			15,8	4	27	<0,0001

*LSD Fisher (Alfa=0.05)

En este caso se encontró diferencia significativa para contrastes ($p \leq 0,05$) en las comparaciones Control vs Pr-Cor+Ram, en Control vs Pl-Cor+Ram y PL-Cor vs Pr-Cor.

Las pruebas de hipótesis para DA demuestran diferencias cuando se usa materia prima de cortezas más ramas. También se notan diferencias para los métodos de pirólisis.

Los promedios de DA varían entre 1,20 y 1,62 m, como se aprecia en la Figura 47.

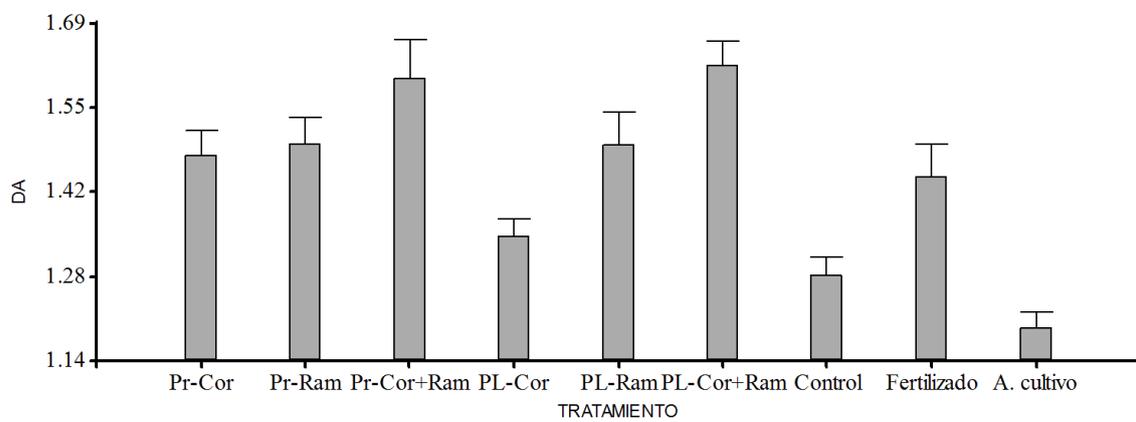


Figura 47: Medias de densidad aparente (g/cm³)

Cuadro 34: Porosidad del suelo (%)

TRATAMIENTO	DA (g/cm ³)	Porosidad (%)
PL-Cor+Ram	1.62	38,92
Pr-Cor+Ram	1.60	39,58
Pr-Ram	1.49	43,92
PL-Ram	1.49	43,92
Pr-Cor	1.48	44,32
Fertilizado	1.44	45,65
PL-Cor	1.34	49,32
Control	1.28	51,58
A. cultivo	1.20	54,72

En suelos muy arenosos la reducción de la porosidad total puede significar una mayor retención de agua en el suelo por aumento de microporos y la reducción de macroporos y esto se ve con la distribución del tamaño de los poros que no se ha realizado en este estudio, pero en general el biochar mejora las propiedades fisicoquímicas como DA y la microporosidad, así como lo reportó (Crombie *et al.*, 2015).

4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS TRATAMIENTOS

OBJETIVO ESPECÍFICO.- Establecer la viabilidad de esta práctica de enmienda al suelo, fundamentándola en el análisis económico y de los procedimientos agronómicos realizados.

4.5.1. Análisis económico

Como lo experimentó Huerta AP (2005) en el análisis económico para ensayos de pruebas en campo, la población está compuesta por el conjunto de datos que corresponden al rendimiento de las cosechas (en este caso granos de maíz al 13% de humedad), resultantes de todas las parcelas que se disponen en el área experimental. De la misma forma la muestra se compone por el conjunto de mediciones de plantas de maíz que fueron sometidas a tratamientos de diferentes dosis de biochar en las unidades experimentales. Por lo tanto los resultados del análisis económico presente, corresponden a las condiciones de estudio de Bullcay en el austro ecuatoriano.

Este procedimiento nos permite obtener información experimental y poder hacer relaciones acerca del comportamiento del biochar para posteriormente realizar pruebas ampliadas por parte del equipo técnico del INIAP en otras locaciones de la región y la consecuente extensión de la propuesta tecnológica.

Los otros componentes del rendimiento como: choclo, IAF, biomasa, alturas y diámetros, indican que los rendimientos de los tratamientos en las repeticiones presentan inferencias, mostrando evidencia estadística de que el biochar mejora los rendimientos. En el análisis de suelo, existe una alta diferencia estadística, revelando mejoras sustanciales en densidad y porosidad que permiten aumentar el rendimiento de los tratamientos y la rentabilidad de los mismos a largo plazo.

Las pruebas de contrastes en las comparaciones de los diferentes tratamientos, mostraron inferencias estadísticas que se confirman en el análisis de costos. El estudio económico que describe el incremento de la producción y que se fundamenta en la teoría económica con visión empresarial, parte del supuesto de que el objetivo principal de la actividad agrícola, es la maximización de los beneficios, para lo cual debe aumentar la producción siempre que los beneficios resultantes sean superiores a los costes y el impacto ambiental sea mínimo (Huerta AP, 2005).

Para el análisis económico expresado en Dólares Americanos (USD), se tomaron los costos de producción que presenta el INIAP de 2374,73 USD por una hectárea de maíz, ANEXO

14 y los valores de la fertilización, se obtuvieron de la guía de manejo de la variedad *Misqui Sara* (INIAP, 2010).

En función de que el interés de la presente investigación radicó en validar el incremento productivo del maíz con la aplicación de biochar, nos centramos en el estudio de los rendimientos, por lo que para el análisis económico, los precios de elaboración de biochar de residuos forestales que se usaron en el análisis, fueron referidos por la investigación de Dickinson *et al.* (2015) que indica valores para un rango de costo ($\pm 25\%$) de 99 a 259 USD por tonelada de biochar de residuos forestales, dependiendo de la tecnología utilizada para su producción ya sea con métodos simples en tierra o con hornos para elaboración de biochar.

Estos valores referenciales guardan proporcionalidad con otros estudios anteriores como el de las estimaciones de Shackley *et al.* (2011) que reportan valores de 166 a 230 USD por tonelada para biochar de residuos forestales, variando en sus costos, de acuerdo a los métodos de elaboración.

El trabajo desarrollado por Owen *et al.* (2009) establece valores de 159 USD por tonelada para procedimientos de elaboración básicos, relacionando con lo hallado por Kumar y Sarkar (2009) que reportan valores de 173 USD. Mientras que en el otro extremo con tecnologías más elaboradas Mc Carl *et al.* (2009) determinó valores de 258 USD por tonelada de biochar.

El costo de comercialización del maíz de 1100 USD por tonelada, fue tomado del Acuerdo Ministerial N. 059 del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, propuesto por el Consejo Consultivo de la cadena Agroalimentaria, para la categoría maíz blanco seco suave, con un 13 % de humedad .

El análisis económico de rendimiento, costos y beneficios, se presenta en el Cuadro 35.

Cuadro 35: Análisis económico por hectárea del cultivo de maíz con biochar (USD)

TRATAMIENTOS	RENDIMIENTO (tn ha⁻¹)	COSTOS DE PRODUCCIÓN	COSTOS DE BIOCHAR O FERTILIZACIÓN	COSTO TOTAL	VALOR BRUTO DE LA PRODUCCIÓN	BENEFICIO NETO	TASA MARGINAL DE RETORNO (%)
Pr-Cor+Ram	9.64	2374.73	1295	3669.73	10604	6934.27	188.95
Pl-Cor	8.94	2374.73	495	2869.73	9834	6964.27	242.68
Pr-Cor	8.68	2374.73	1295	3669.73	9548	5878.27	160.18
Pr-Ram	8.45	2374.73	1295	3669.73	9295	5625.27	153.28
Pl-Cor+Ram	8.25	2374.73	495	2869.73	9075	6205.27	216.23
Pl-Ram	8.08	2374.73	495	2869.73	8888	6018.27	209.71
Fertilizado	7.71	2374.73	358.68	2733.41	8481	5747.59	210.27
Control	7.56	2374.73	0	2374.73	8316	5941.27	250.18

Considerando la tasa marginal de retorno, el tratamiento Pl-Cor obtuvo una ganancia de 242.68 %, de cada dólar invertido. En caso del tratamiento Pr-Ram, fue el porcentaje más bajo de 153.28 %. Estos registros porcentuales superan la tasa de retorno mínima aceptable recomendada por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), donde indica que, valores mayores al 50 % en este indicador, se consideran adecuados, para seleccionarse como posibles ajustes a prácticas agrícolas comunes (fertilización).

Al comparar los beneficios netos (análisis de dominancia), el tratamiento con Pl-Cor domina económicamente en términos absolutos con una ganancia de USD 6964.27 debido al efecto de aplicación del biochar.

4.5.2. Jerarquización de los tratamientos por beneficio neto

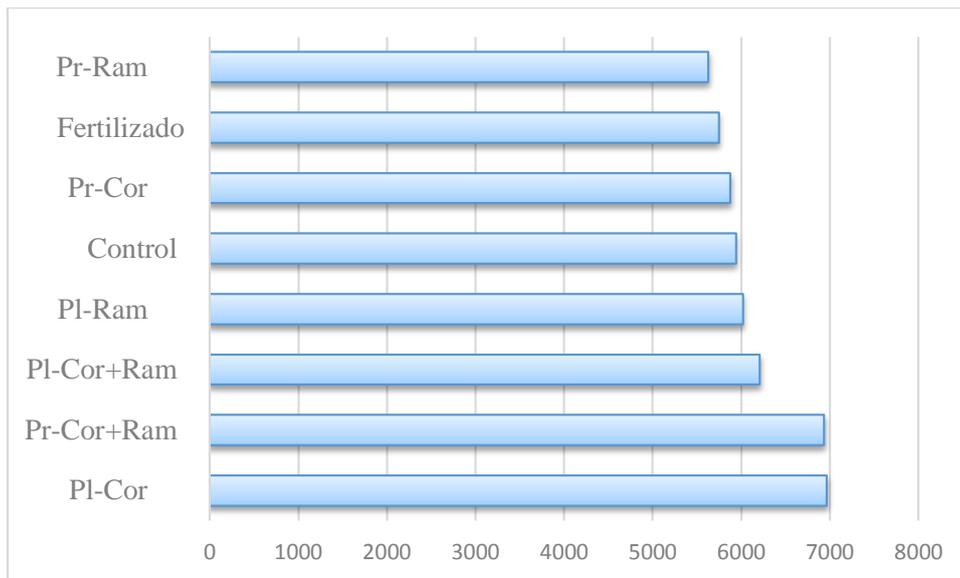


Figura 48: Comparación del beneficio neto en los tratamientos

El periodo de recuperación de la inversión para todos los tratamientos donde se aplicó biochar, es de un período de cultivo (ejercicio agrícola), este factor indica que la inversión por aplicación de biochar en maíz, se recupera en el primer ciclo anual de cultivo. El efecto del biochar estudiado en producción de maíz por Dickinson *et al.* (2015), refiere mejoras persistentes de los rendimientos hasta los cuatro años y estimaciones de mejora productiva de 25 a 30 años.

El beneficio neto con algunos tratamientos de biochar es superior a los tratamientos control y fertilizado. Los beneficios encontrados para los tratamientos con biochar muestran niveles superiores a la fertilización (que se tiene que realizar de manera anual) frente a los tratamientos con biochar que se mantienen en el suelo por largos períodos.

Análisis Holístico

Huerta AP (2005) indica que el tema del desarrollo sostenible está vinculado al medio ambiente y su conservación. Las corrientes ambientalistas actuales, reflejadas en las propuestas de los sectores de investigación académicos públicos y privados, es impulsar ideas para el desarrollo rural sostenible contenido en asociaciones de fertilización química y métodos alternativos como el biochar, que permiten la recirculación de nutrientes, proporcionando un valor agregado a la producción y la conservación del suelo en los ecosistemas rurales. La agricultura sustentable generalmente se refiere a un modo de

producción agrícola que intenta proveer rendimientos sostenidos durante largo tiempo, mediante el uso de tecnologías ecológicamente probadas.

La ponencia “El desarrollo sostenible como nuevo paradigma” (Lima, Dic. 2005) del Dr. Alfonso Pablo Huerta Fernández, expresa que la aplicación de tecnologías basadas en el alto uso de fertilizantes químicos, biocidas y desarrollo de variedades mejoradas, ha sido hasta ahora la alternativa más difundida para incrementar la producción de cultivos.

De esta manera, actualmente se cuestiona la sustentabilidad de los sistemas agrícolas no sólo por las altas subvenciones energéticas que requieren sino por sus efectos ecológicos. Por el conflicto ambiental, aparece la necesidad de mantener (o incrementar) la productividad actual, disminuyendo los impactos negativos en el medio ambiente, es decir se trata de transformar tales sistemas tradicionales en una agricultura alternativa, compatible ecológicamente y viable a nivel económico; y es ahí donde la agricultura sostenible se plantea como una vía adecuada para dicha transformación.

El artículo “La investigación para la agricultura sostenible” (Lima, Nov. 2004) del mismo autor, recomienda examinar la manera de producir más alimentos sin degradar nuestros recursos naturales. La investigación agraria ha sido un factor importante en el incremento de la producción mundial de alimentos. La erosión del suelo, el anegamiento y la salinización, el uso excesivo de fertilizantes minerales y plaguicidas, la pérdida de la diversidad genética, la deforestación y el agotamiento de los suministros hídricos constituyen amenazas graves al mantenimiento y aumento de los niveles de producción alimentaria.

Por esta razón es necesario diseñar políticas y programas para el desarrollo agrícola que mantenga y conserve la base de los recursos naturales con miras a la sostenibilidad. Es aquí donde la propuesta del uso de biochar, como un mejorador de las condiciones de producción se inserta en el proceso de producción agropecuaria y se complementa con su capacidad ambiental de secuestrar carbono en el suelo.

V. CONCLUSIONES

1. En forma general, bajo las condiciones estudiadas de cultivo en Bullcay provincia de Azuay en Ecuador, se encontró incremento en los rendimientos del maíz híbrido INIAP 103 *Mishqui Sara* con el uso del biochar elaborado a partir de biomasa residual de eucalipto, así como otras características fenológicas de crecimiento y se espera que el efecto de este biocarbón tenga respuestas residuales a mediano y largo plazo para posteriores cultivos.
2. En las pruebas de elaboración de biochar en laboratorio con horno de mufla, El mejor resultado, se consiguió a 400 °C con la relación ceniza sobre carbón del 8 por ciento. Para la pirólisis rápida, se obtuvo una mayor cantidad de biochar en peso a partir de biomasa de ramas 30.8 por ciento frente a cortezas 25.8 por ciento. En la pirólisis bajo tierra existe mayor dificultad para el control de temperatura.
3. Los mayores porcentajes de germinación se lograron con la dosis media de dilución de biochar agua. La dosis alta tuvo un pH más bajo, lo que no resultó favorable para la germinación de las semillas. La biomasa sola, tanto de ramas cuanto de cortezas, también mostró condiciones desfavorables para la germinación, por la acidez que producen al hidrolizarse.
4. Los resultados del análisis de laboratorio para el biochar, indicaron que la disponibilidad de elementos es mayor en la materia pirolizada, para los macroelementos de fósforo y potasio y en lo que respecta a los microelementos, para el hierro, zinc, cobre, manganeso y boro. El porcentaje de carbono tiene rangos similares en la materia pirolizada y en la biomasa.
5. La temperatura es determinante en la formación de cenizas, especialmente para la pirólisis bajo tierra y que se reflejó en los niveles de pH y en la conductividad eléctrica, principalmente al tratar cortezas bajo tierra.
6. Los mayores rendimientos de grano seco se lograron con los tratamientos donde se aplicó biochar elaborado con cortezas y ramas de eucalipto por el método de pirólisis rápida, superando al tratamiento fertilizado.

7. La incorporación de biochar al cultivo de maíz, ocasionó también aumento de los contenidos del porcentaje de proteína en grano seco.
8. Para el índice de área foliar (IAF) los tratamientos con biochar elaborado por el método de pirólisis rápida, en horno de retorta, lograron los mejores resultados y se mostraron superiores a los biochar producidos bajo tierra.
9. La altura y diámetro de plantas fue mayor para los tratamientos con biochar elaborado con pirólisis rápida y el tratamiento fertilizado, demostraron los mejores resultados.
10. En la prueba de contraste para la producción de biomasa del maíz para las diferentes características del biochar mostró diferencias significativas con el biochar producido mediante pirólisis rápida.
11. El pH del suelo se incrementa con la aplicación de biochar favoreciendo a suelos ácidos como los de la zona austral, pudiendo así actuar como compensador de la acidez del suelo en el cultivo del maíz. También la disponibilidad de nitrógeno en el suelo se incrementa en los tratamientos que tienen biochar producido por el método de pirólisis lenta.
12. Se incrementó el secuestro de carbono en el suelo con los tratamientos de biochar al cultivo, comparándolo con los controles.
13. El cambio en la densidad aparente y porosidad del suelo por efecto del biochar fue bastante notable, siendo mejor el tratamiento de biochar por pirólisis lenta de ramas, que presentó niveles óptimos para ambas propiedades.
14. El análisis de costos muestra que con la aplicación de biochar al cultivo de maíz, se logran beneficios netos importantes para ser aprovechados agronómicamente y que la tasa de recuperación del biochar en el cultivo de maíz, se capitaliza en el primer ciclo de cultivo.

VI. RECOMENDACIONES

La producción de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto, es viable y se consigue realizar con los dos métodos de pirólisis, tanto en horno como bajo tierra

La zona austral del Ecuador y con las condiciones climáticas y geográficas imperantes, para producción en horno, se recomienda pirolizar la biomasa a 400 °C en un tiempo de dos horas, donde se consigue la mejor relación ceniza/carbón. Se podría probar diferentes tipos de biomasa para pirolización.

Para la pirólisis de biomasa, bajo tierra es importante compactar el suelo, para reducir la excesiva entrada de oxígeno y evitar temperaturas muy altas de pirólisis, que resultan de difícil control y se ven reflejadas en la cantidad de ceniza obtenida junto con el carbón.

El biochar se puede utilizar en el cultivo de maíz como un corrector de la acidez del suelo, debido a su condición alcalina, lo que propicia la mejor asimilación de nutrientes.

La dosis que presenta mejores condiciones de germinación y de crecimiento de las plántulas de maíz es 5 t ha⁻¹ aplicado al suelo al fondo de surco, al inicio del cultivo como enmienda. Se podría probar otras dosis de esta enmienda, para medir el efecto alcalinizante en el suelo.

Es preciso evitar la presencia de biomasa residual y la consecuente descomposición o quema del material sobre el suelo agrícola, toda vez que se daña la estructura y la hidrolización de sus compuestos produce la acidificación en las capas de suelo, durante el proceso de desintegración.

Es procedente propiciar la elaboración y utilización de biochar de biomasa residual de eucalipto en otros cultivos tradicionales, para lograr la integración de nutrientes en los sistemas agroforestales de la región andina.

Se recomienda elaborar biochar de otro tipo de biomasa o residuos que no sean procesados adecuadamente en la granja o que representen una dificultad en la gestión de los sistemas agropecuarios.

Se podría realizar nuevas investigaciones que incluyan pruebas con biochar en otros cultivos agrarios u ornamentales que se realizan en la región y además combinar tratamientos con biochar y niveles menores de fertilización.

Sería importante en futuros estudios, analizar el rendimiento de maíz con otros tipos de biochar, utilizando otras materias primas de origen orgánico para la producción del biochar, como puede ser residuos orgánicos.

Debido a las propiedades de retención y bloqueo de elementos orgánicos, se podría probar el biochar de eucalipto en la remediación ambiental de suelos contaminados por agroquímicos, la retención de metales pesados y de hidrocarburos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelmigid, HM; Morsi, MM. 2017. Cytotoxic and molecular impacts of allelopathic effects of leaf residues of *Eucalyptus globulus* on soybean (*Glycine max*). *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* 2017: 4-9.

Aggangan, RT; O'Connell, AM; McGrath, JF; Dell, B. 1998. Fertilizer and previous land use effects on C and N mineralization in soils from *Eucalyptus globulus* plantations. *Soil Biology & Biochemistry* 30(13): 1791-1798.

Agricultura Regenerativa. 2016. Cómo hacer Biochar o Carbón Vegetal. Consultado 22 nov. 2016. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=VXtuoOVCFhM> (Agricultura regenerativa).

Alcañiz, J.; Ubalde, J.; Domene, X; Carabassa, V; Cañizares, R; Raya, I; Mattana, S. 2014. Algunos efectos de un biocarbón (biochar) de pino sobre la producción y calidad de la uva. *Research Gate* 2014.

Alegre, J; Arevalo, L; Ricse, A. 2002. Reservas de Carbono con Diferentes Sistemas de Uso de la Tierra en dos Sitios de la Amazonia Peruana. ICRAF/INIA. 2002.

Álvarez, J; Balboa, M; Merino, A; Rodríguez, R. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. 1: 21-30.

Antuna, O; Rincón, F; Gutiérrez, E; Ruiz, N; Bustamante, L. 2003. componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotécnica Mexicana* 2003.

Arellano, L; Castillo-Guevara, C. 2014. Efecto de los incendios forestales no controlados en el ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en un bosque templado del centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(3): 854-865.

Avendaño, J. 2008. Modelos Genéricos de Biomasa Aérea para Especies Forestales en Función de la Arquitectura y la Ocupación del Rodal. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE Costa Rica. 114 p.

- Balboa, M. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. Y *Quercus robur* L. En Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 256 p.
- Balmelli, G; Resquin, F. 2005. Evaluación productiva de orígenes de *Eucalyptus globulus* en zonas litoral y norte. Serie Técnica INIA 149: 1-19.
- Braun, AC; Troeger, D; Garcia, R; Aguayo, M; Barra, R; Vogt, J. 2017. Assessing the impact of plantation forestry on plant biodiversity: A comparison of sites in Central Chile and Chilean Patagonia. *Global Ecology and Conservation* 10: 159-172.
- Burneo, PC; Gunkel, G. 2003. Ecology of a high Andean stream, Rio Itambi, Otavalo, Ecuador. *Limnologica* 33(1): 29-43.
- Cabrales, R; Montoya, R; Rivera, J. 2007. Evaluación agronómica de 25 genotipos de maíz (*Zea mays*) con fines forrajeros en el valle del Sinú medio. Colombia. *Revista MVZ Córdoba* no.2: 1054-1060.
- Camacho, RG; Garrido, O; Lima, MG. 1995. Caracterización de nueve genotipos de maíz en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz. *Science agriculture Piracicaba* 52(1): 294-298.
- Campo Velasquez, J. 2012. Efectos de incendios experimentales repetidos en la agregación del suelo y su evolución temporal. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia España. 688 p.
- Ceccon, E; Martínez-Ramos, M. 1999. Aspectos ambientales referentes al establecimiento de plantaciones de eucalipto de gran escala en áreas tropicales: Aplicación al caso de México. *Interciencia* 24(6): 352-359.
- Chacon, G; Gagnon, D; Pare, D; Prouix, D. 2003. Impacto de la Deforestación, pastizales, plantaciones de eucalipto y Pino en Suelos de Bosque Montano Alto, en la Sierra Sur del Ecuador. 2003: 17.
- Chiliquinga, L; Jiménez, M. 2015. Análisis energético del biocalentón de aplicación múltiple por combustión de biomasa leñosa. Tesis de Maestría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE del Ecuador. 192 p.
- CIMMYT. 2017. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo de México. Consultado 15 ene. 2017. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/228220072/Manual-Para->

La-Estimacion-de-Productividad-Del-Cultivo-Del-Maiz (Manual Para La Estimacion de Productividad Del Cultivo Del Maiz).

Crombie, K; Mašek, O; Cross, A; Sohi, S. 2015. Biochar - synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. *GCB Bioenergy* 7(5): 1161-1175.

Curiel, M. 2016. Caracterización de residuos de vid transformados a biochar. Tesis de titulación en Enología Universidad de Valladolid. España. 87 p.

Cuvi, N. 2005. Dos cajones con semillas de Eucalipto. Ecuador: Revista Ecuador Terra Incognita, No. 37, Septiembre-October. 2005.

Daniel, O; Couto, L. 1999. Una visión general de sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles con Eucalipto en Brasil. *Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica* 1999: 337-354.

Delgado, S; Aliaume, F; Hernández, J. 2006. Summary the effects of *Eucalyptus sp* . plantations on Uruguay natural resources . *Agrociencia* 2: 95-108.

Dickinson, D; Balduccio, L; Buysse, J; Ronsse, F; van Huylenbroeck, G; Prins, W. 2015. Cost-benefit analysis of using biochar to improve cereals agriculture. *GCB Bioenergy* 7(4): 850-864.

Doerr, SH; Shakesby, RA; Walsh, RPD. 1996. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the Agueda Basin, Portugal. *Catena* 27(1): 25-47.

Donoso, S; Obispo, A; Sanchez, C; Ruíz, F; Herrera, M. 1999. Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el suroeste de España. *Revista de Investigación Recursos Forestales* 8(2): 377-387.

Dopazo Amoedo, R; Vega Nieva, D; Ortíz Torres, L; Martínez Chamorro, E. 2009. El aprovechamiento de biomasa residual y de cultivos energéticos: experiencias recientes y modelos de producción de biomasa forestal en montes gallegos. *Montes y Sociedad*. Quinto Congreso Forestal Español 2009: 1-13.

Escalante, A; Pérez, G; Hidalgo, C; López, J; Campo, J; Valtierra, E; Etchevers, J. 2016. Biobarbon (Biochar) I Naturaleza, fabricación y uso en el suelo. *Red de revistas científicas de América Latina* 34(3): 367-382.

Espinoza García, F. 1996. Revisión sobre la alelopatía de *Eucalyptus* L. Herit. Ecología Evolutiva, Universidad Nacional Autónoma de México 1996: 36464-36483.

FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 723 p.

FAO. 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Depósito de documentos No. 41. Dirección de publicaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. M-37 ISBN 92-5-301328-1. 1983.

Federici, S; Tubiello, FN; Salvatore, M; Jacobs, H; Schmidhuber, J. 2015. New estimates of CO₂ forest emissions and removals: 1990-2015. *Forest Ecology and Management* 352: 89-98.

Fernández, C; Vega, JA; Gras, JM; Fonturbel, T; Cuiñas, P; Dambrine, E; Alonso, M. 2004. Soil erosion after *Eucalyptus globulus* clearcutting: Differences between logging slash disposal treatments. *Forest Ecology and Management* 195(1-2): 85-95.

Ferrere, P; Lupi, A; Boca, R. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22(1, 2): 100-113.

Frišták, V; Friesl-Hanl, W; Wawra, A; Pipíška, M; Soja, G. 2015. Effect of biochar artificial ageing on Cd and Cu sorption characteristics. *Journal of Geochemical Exploration* 159: 178-184.

García-Villabrille, JD. 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el Noroeste de España. Tesis Doctoral. Universidad Santiago de Compostela España. 207 p.

Gilces Reyna, MA. 2014. Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. Tesis de Master. Universidad de Valladolid. España. 120 p.

Gobierno Provincial del Azuay. 2015. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Azuay. Actualizado 2015- 2030. Dirección de Planificación. Coordinación de Ordenamiento Territorial 2015: 310.

Gonza Carnero, K; López Medina, E; Zavaleta Salvatierra, C; De La Cruz Castillo, J; Mendoza Miranda, W. 2013. Efecto biofungicida de *Trichoderma harzianum* y de extractos de *Eucalyptus globulus* , *Rosmarinus officinalis* y *Ricinus communis* sobre *Rhizoctonia*

solani. Revista Científica. Facultad de Ciencias Biológicas - Universidad Nacional de Trujillo 1(1): 43-48.

Gonzalez Gamboa, V; Barkmann, J; Marggraf, R. 2010. Social network effects on the adoption of agroforestry species: Preliminary results of a study on differences on adoption patterns in Southern Ecuador. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 4: 71-82.

Grattapaglia, D; Kirst, M. 2008. *Eucalyptus* applied genomics: From gene sequences to breeding tools. *New Phytologist* 179(4): 911-929.

Guerra, P. 2014. 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. 101 p.

Guillen, J; Mori, S; Paucar, LM. 2014. Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L.) var. subnigroviolaceo. *Scientia Agropecuaria* 5(4): 211-217.

Hagner, M; Hallman, S; Jauhainen, L; Kempainen, R; Rämö, S; Tiilikkala, K; Setälä, H. 2015. Birch (*Betula* spp.) wood biochar is a potential soil amendment to reduce glyphosate leaching in agricultural soils. *Journal of Environmental Management* 164: 46-52.

Hernández, A; Baños, S; Velázquez, M. 2007. Prospectiva de extractos vegetales para controlar enfermedades postcosecha hortofrutícolas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(2): 119-123.

Hernández, J. 2002. Producción de biomasa para leña combustible, de una plantación de 12 años de edad de *Eucalyptus globulus* Labill. Tesis de Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma de Chapingo México. 104 p.

Huber, A; Iroumé, A; Mohr, C; Frêne, C. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío Chile. *Revista Bosque* 31(3): 219-230.

Huerta, AP. 2005. Efecto de diferentes niveles de fertilización en el incremento de productividad de espárrago en el valle de Virú. Tesis Doctoral en Economía y Desarrollo Industrial. Universidad Nacional de Trujillo-Perú. 124p.

Iglesias, S. 2014. Factores que inciden en el rendimiento del *Eucalyptus globulus* y valoración ambiental en la subcuenca del río Burgay, provincia del Cañar. Tesis de Maestría

en Protección y Remediación Ambiental. Universidad Católica de Cuenca-Ecuador. 132 p.

INIA. 2013. Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú. Información Técnica de la variedad maíz choclero INIA 620–*Wari*. Consultado 12 ago. 2017. Disponible en <http://www.inia.gob.pe/prod-servicios/publicaciones/publicacion/tripticos/item/188-06-2013-maiz-choclero-inia-620-wari>

INIAP. 2010. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador. Ficha técnica para la variedad INIAP-103 *Mishqui Sara*. Fichas Técnicas de Cultivo 2010.

Jayaram, S; Kapoor, S; Dharmesh, SM. 2015. Pectic polysaccharide from corn (*Zea mays* L.) effectively inhibited multi-step mediated cancer cell growth and metastasis. *Chemico-Biological Interactions* 235: 63-75.

Jeffery, S; Bezemer, TM; Cornelissen, G; Kuyper, TW; Lehmann, J; Mommer, L; Sohi, SP; van de Voorde, TFJ; Wardle, DA; van Groenigen, JW. 2015. The way forward in biochar research: Targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenergy* 7(1): 1-13.

Jiménez, J; Aguirre, O; Treviño, E. 2008. Capacidad de captura de carbono en ecosistemas mixtos en el estado de Tamaulipas. *Revista de la facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León* 2008.

Jurado, P; Lara, C; Saucedo, R. 2014. Producción de maíz forrajero, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Experimental Chihuahua-México 2014: 43.

Kanninen, M. 2003. Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global. Depósito de documentos de la FAO. Consultado 24 oct. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/y4435s/y4435s09.htm>

Khan, S; Waqas, M; Ding, F; Shamshad, 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.

Kumar A, Sarkar S. 2009. Techno-economic assessment of biomass conversion to charcoal for carbon sequestration. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

Longchamp, M; Castrec-Rouelle, M; Biron, P; Bariac, T. 2015. Variations in the accumulation, localization and rate of metabolization of selenium in mature *Zea mays* plants

supplied with selenite or selenate. *Food Chemistry* 182: 128-135.

Mc Carl BA, Peacocke C, Chrisman R. 2009. Economics of biochar production, utilization and greenhouse gas offsets. In: *Biochar for Environmental Management* (eds Lehmann J, Joseph S), pp. 341–358. Earthscan, London.

Martínez, R; Azpíroz, H; Rodríguez, JL; Espinoza, V; Alcalá, C; Gutiérrez Espinoza, M. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. *Revista Ra Ximhai de la Universidad Autónoma Indígena de México* 2: 815-846.

Mathers, NJ; Mendham, DS; O'Connell, AM; Grove, TS; Xu, ZH; Saffigna, PG. 2003. How does residue management impact soil organic matter composition and quality under *Eucalyptus globulus* plantations in Southwestern, Australia? *Forest Ecology and Management* 179(1-3): 253-267.

Mendez, J; Merazo, F; Zerpa, M; Bolívar, C. 2008. Efecto de la colocación de semillas de maíz, caraota y algodón en papel toallín sobre la germinación y el vigor. *Revista UDO Agrícola* 8(1): 67-71.

Mendham, DS; Heagney, EC; Corbeels, M; O'Connell, AM; Grove, TS; McMurtrie, RE. 2004. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biology and Biochemistry* 36(7): 1067-1074.

Moreno, JC; López, G; Siche, R. 2010. Modeling and optimization of extraction process of eucalyptus essential oil (*Eucalyptus globulus*). *Scientia Agropecuaria* 1: 147-154.

Muñoz, F; Rubilar, R; Espinosa, M; Cancino, J; Toro, J; Herrera, M. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens*. *Forest Ecology and Management* 255(3-4): 365-373.

Neidhardt, H; Kramar, U; Tang, X; Guo, H; Norra, S. 2015. Arsenic accumulation in the roots of *Helianthus annuus* and *Zea mays* by irrigation with arsenic-rich groundwater: Insights from synchrotron X-ray fluorescence imaging. *Chemie der Erde - Geochemistry* 75(2): 261-270.

Niemann, H; Matthias, I; Michalzik, B; Behling, H. 2013. Late Holocene human impact and environmental change inferred from a multi-proxy lake sediment record in the Loja region, southeastern Ecuador. *Quaternary International* 308-309: 253-264.

Njuguna, E; Gathara, M; Nadir, S; Mwalusepo, S; Williamson, D; Mwalusepo, P; Kimani, J; Landmann, T; Juma, G; Ong'amo, G; Gatebe, E; Ru, B Le; Calatayud, P. 2015. Characteristics of soils in selected maize growing sites along altitudinal gradients in East African highlands. Data in Brief 5: 138-144.

Noguera J., MA; Vélez L., JA. 2011. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. Revista de Ciencias Agrícolas 28(1): 40-52.

Oliva, M; Culqui Mirano, L; Leiva, S; Collazos, R; Salas, R; Vásquez, H; Maicelo Quintana, JL. 2017. Reserve of carbon in a silvopastoral system composed of *Pinus patula* and native herbaceous. Scientia Agropecuaria 8(2): 149-157.

Ortiz, L; Tejada, A; Vázquez, A; Veiras, GP. 2003. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Revista CIS-Madera 2003: 17-32.

Oses Orbegozo, A. 2013. Efectos de la aplicación de biochar en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas. Tesis de Master. Universidad Autónoma de Barcelona España. 96 p.

Owen M, Openshaw K, Rvd Plas. 2009. Malawi biomass energy strategy. Final Version. Government of Malawi, Lilongwe, Malawi.

Paco Abenza, D. 2012. Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Tesis de fin de carrera. Universidad Autónoma de Barcelona España. 111 p.

Pariona, N; Martinez, AI; Hdz-García, HM; Cruz, LA; Hernandez-Valdes, A. 2016. Effects of hematite and ferrihydrite nanoparticles on germination and growth of maize seedlings. Saudi Journal of Biological Sciences 2016: 1547-1554.

Pearsall, DM; Chandler-Ezell, K; Zeidler, JA. 2004. Maize in ancient Ecuador: Results of residue analysis of stone tools from the Real Alto site. Journal of Archaeological Science 31(8): 423-442.

Peña, E; Flórez, M; Camargo, GDJ. 2014. Evaluación de la eficiencia térmica del proceso de gasificación, de los residuos maderables, en el jardín botánico José Celestino Mutis de Bogotá. Semillero de Investigación Facultad de Ingeniería Mecánica 2014.

Pérez-Cabello, F; de la Riva Fernández, J; Montorio Llovería, R; García-Martín, A. 2006. Mapping erosion-sensitive areas after wildfires using fieldwork, remote sensing, and

geographic information systems techniques on a regional scale. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 111(4): 1-13.

Piperno, DR. 2003. A few kernels short of a cob: on the Staller and Thompson late entry scenario for the introduction of maize into northern South America. *Journal of Archaeological Science* 30(7): 831-836.

Pozas, J. 2012. Proyecto básico de una planta de biomasa de *Eucalyptus globulus* en España. Tesis de fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 174 p.

Qiu, M; Sun, K; Jin, J; Han, L; Sun, H; Zhao, Y; Xia, X; Wu, F; Xing, B. 2015. Metal/metalloid elements and polycyclic aromatic hydrocarbon in various biochars: The effect of feedstock, temperature, minerals, and properties. *Environmental Pollution* 206: 298-305.

Reents, N. 2014. Biochar Adsorber Design. Aqueous Solutions. North Carolina State University (Raleigh NC 27695 EE.UU).

Rigueiro, A; Dans del Valle, F. 2007. Producción y reciclaje en los sistemas agroforestales : La biomasa forestal primaria. Asociación Forestal de Galicia 2007.

Ríos, N; Stashenko, EE; Duque, JE. 2017. Evaluation of the insecticidal activity of essential oils and their mixtures against *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Revista Brasileira de Entomologia* 2017.

Robertson, KM; Hsieh, YP; Bugna, GC. 2014. Fire environment effects on particulate matter emission factors in southeastern U.S. Pine-grasslands. *Atmospheric Environment* 99: 104-111.

Roxburgh, SH; Wood, SW; Mackey, BG; Woldendorp, G; Gibbons, P. 2006. Assessing the carbon sequestration potential of managed forests: A case study from temperate Australia. *Journal of Applied Ecology* 43(6): 1149-1159.

Sackett, TE; Basiliko, N; Noyce, GL; Winsborough, C; Schurman, J; Ikeda, C; Thomas, SC. 2015. Soil and greenhouse gas responses to biochar additions in a temperate hardwood forest. *GCB Bioenergy* 7(5): 1062-1074.

Salari, MH; Amine, G; Shirazi, MH; Hafezi, R; Mohammadypour, M. 2006. Antibacterial effects of *Eucalyptus globulus* leaf extract on pathogenic bacteria isolated from specimens

of patients with respiratory tract disorders. *Clinical Microbiology and Infection* 12(2): 194-196.

Salas, C; Alegre, J; Iglesias, S. 2017. Estimation of above-ground live biomass and carbon stocks in different plant formations and in the soil of dry forests of the Ecuadorian coast. *Food and Energy Security*. 2007: 1-7.

Shackley S, Hammond J, Gaunt J et. 2011. The feasibility and costs of biochar deployment in UK. *Carbon Management*, 2, 335–356.

Skolmen, RG; Thomas, F. 1999. *Eucalyptus globulus* Labill. Eucalipto goma azul. *Silvicultura Forestal* 6: 205-210.

Soplín, J; Rengifo, A; Chumbe, J. 1993. Análisis de crecimiento en *Zea mays* L. y *Archis hypogaea* L. *Folia Amazónica* 5: 171-189.

Staller, JE. 2003. An examination of the palaeobotanical and chronological evidence for an early introduction of maize (*Zea mays* L.) into South America: A response to Pearsall. *Journal of Archaeological Science* 30(3): 373-380.

Suárez, E; Anchaluisa, S. 2013. Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; Myrtaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *Avances* 5(2).

Sun, X; Shan, R; Li, X; Pan, J; Liu, X; Deng, R; Song, J. 2017. Characterization of 60 types of Chinese biomass waste and resultant biochars in terms of their candidacy for soil application. *GCB Bioenergy* 9(9): 1423-1435.

Tenesaca, C; Quindi, T; Delgado, G; Toledo, E; Delgado, O. 2017. Generación del mapa de cobertura y uso del suelo de la provincia del Azuay. Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador IERSE. *Revista Universidad Verdad de la Universidad del Azuay* 2017: 23-37.

Thammasom, N; Vityakon, P; Lawongsa, P; Saenjan, P. 2016. Biochar and rice straw have different effects on soil productivity, greenhouse gas emission and carbon sequestration in Northeast Thailand paddy soil. *Agriculture and Natural Resources* 50(3): 192-198.

Timoteo, K; Remuzgo, J; Valdivia, L; Sales, F; Soria, DG; Abanto, C. 2016. Estimation of Carbon Storage in Three Agroforestry Systems During the First Year of Installation in the

Department of Huanuco Folia. Folia Amazónica 25(1): 45-54.

Torres-Sallan, G; Ortiz, O; Ubalde, JM; Sort, X; Alcañiz, JM. 2014. El biocarbón (biochar): una forma de secuestrar carbono y de transferir menos contaminantes al subsuelo y acuíferos. Jornades Ambientals sobre Contaminació d'Aigua del Subsòl 1: 40037.

Vargas, LA. 2014. El maíz, viajero sin equipaje. Simposio "Somos de maíz: principio y destino". Instituto Nacional de Ciencias Médica. Anales de Antropología 48(1): 123-137.

Vera, DV; Delfini, GL; Montiel, LG; Díaz, E; Ávila, FS; Fiallos, FG; Bone, GM. 2013. Análisis de estabilidad para el rendimiento de híbridos de maíz (*Zea mays*) en la Región Central del Litoral Ecuatoriano. Scientia Agropecuaria 2013: 211-218.

Vergara-Sánchez, MA; Etchevers-Barra, JD. 2006. Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. Agrociencia 40(5): 557-567.

Vidal, N; Barbosa, H; Jacob, S; Arruda, M. 2015. Comparative study of transgenic and non-transgenic maize (*Zea mays*) flours commercialized in Brazil, focussing on proteomic analyses. Food Chemistry 180: 288-294.

Villacis, J. 2012. Determinación del potencial de captura de carbono de las especies forestales de aliso (*Alnus acuminata*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en la localidad de Florida Pomacochas Amazonas. Tesis de Profesionalización. 159 p.

Viloria, H; Méndez, R. 2011. Scientia Agropecuaria Relación entre la conductividad eléctrica , pH del agua de remojo , germinación de semillas y crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays* L .) bajo dos condiciones experimentales Relationship among electrical conductivity , pH of soa. Scientia Agropecuaria 2: 213-228.

Wang, L; Xu, C; Qu, M; Zhang, J. 2008. Kernel amino acid composition and protein content of introgression lines from *Zea mays* ssp. mexicana into cultivated maize. Journal of Cereal Science 48(2): 387-393.

Yadav, A; Ansari, KB; Simha, P; Gaikar, VG; Pandit, AB. 2016. Vacuum pyrolysed biochar for soil amendment. Resource-Efficient Technologies 2: S177-S185.

Yáñez, X; Pérez, OG; Meza, H. 2010. Actividad larvica del aceite esencial foliar de *Eucalyptus globulus* contra *Aedes aegypti* Linnaeus. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Pamplona de Colombia 2010.

Yaranga, R; Cano, M. 2013. Almacenamiento de carbono en pastos naturales altoandinos. *Scientia Agropecuaria* 4: 313-319.

Yeboah, E; Asamoah, G; Kofi, B; Abunyewa, AA. 2016. Effect of Biochar Type and Rate of Application on Maize Yield Indices and Water Use Efficiency on an Ultisol in Ghana. *Energy Procedia* 93(March): 14-18.

Yescas, CP; Segura C., MA; Martinez C., L; Alvarezr, VP; Montemayor T., JA; Orozco V., JA; Frias R., JE. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Phyton* 84(2): 262-279.

Zuluaga Sánchez, P. 2011. El Acceso a la Tierra Asunto Clave para las Mujeres Campesinas en Antioquia, Colombia. *Revista de la Facultad de Agronomía de Medellín* 64(1): 5949-5960.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Distribución de tratamientos aleatorizados y repeticiones

		REPETICIONES			
		R 1	R 2	R 3	R 4
TRATAMIENTOS		Pr-Cor + Ram-R1	Pr-Ram-R2	Fertilizado-R3	Pr-Cor + Ram-R4
		Blanco-R1	Pr-Cor + Ram-R2	Pr-Cor-R3	Pl-Cor + Ram-R4
		Pr-Cor-R1	Pl-Cor-R2	Pl-Ram-R3	Blanco-R4
		Fertilizado-R1	Blanco-R2	Pr-Cor + Ram-R3	Pr-Ram-R4
		Pl-Cor-R1	Pl-Cor + Ram-R2	Pl-Cor-R3	Pl-Ram-R4
		Pl-Ram-R1	Pr-Cor-R2	Pr-Ram-R3	Fertilizado-R4
		Pl-Cor + Ram-R1	Fertilizado-R2	Blanco-R3	Pl-Cor-R4
		Pr-Ram-R1	Pl-Ram-R2	Pl-Cor + Ram-R3	Pr-Cor-R4

Pr = Pirólisis rápida; Pl = Pirólisis lenta; Cor = Cortezas; Ram = Ramas; R = Repetición

ANEXO 2: Métodos utilizados en los análisis de laboratorio

DETERMINACIONES	PROCEDIMIENTO UTILIZADO
pH	Para la determinación del pH se siguen los lineamientos análogos a la norma ASTM D1512-05 (Standard Test Methods for Carbon Black-pH Value) basado en el enfoque de humedecimiento del biochar, sobre una solución simple 1:10 de biochar – agua.
C.E. (dS/m)	Establece los Sólidos Totales Disueltos (TDS). Medida de la conductividad eléctrica (CE) en el extracto de la pasta de saturación.
M.O. (%)	Método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio % MO = % C * 1.724.
N (%)	Método de Nitrógeno de micro-Kjeldahl.
P ₂ O ₅ (%)	Digestión con mezcla nítrica perclórica.
K ₂ O (%)	Digestión con mezcla nítrica perclórica.
CaO (%)	Digestión con mezcla nítrica perclórica.
MgO (%)	Digestión con mezcla nítrica perclórica.
Hd (%)	Cantidad de masa de agua perdida durante el secado de la muestra. Además del vapor de agua existe la posibilidad de expulsar solventes orgánicos de bajo punto de ebullición (< 105°C) como el metanol y ácido acético.
Na (%)	Digestión con mezcla nítrica perclórica.
Cenizas (%)	Es la fracción no orgánica del biochar libre de humedad. El contenido de cenizas del biochar es un indicador de la concentración de nutrientes.
S (%)	Método de Azufre Total por turbilometría.
Fe (ppm)	Espectrofotometría de absorción atómica.
Cu (ppm)	Espectrofotometría de absorción atómica.
Zn (ppm)	Espectrofotometría de absorción atómica
Mn (ppm)	Espectrofotometría de absorción atómica
B (ppm)	Método de la Curcumina.
CIC (meq/100g)	Reemplazamiento con acetato de amonio (CH ₃ – COONH ₄)N, pH 7.0 Cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.
Carbono Total (%)	Mediante el analizador de COT Shimadzu L5000A, calcinando las muestras a 905 °C.
Carbono Orgánico (%)	Carbono oxidable en KMnO ₄
D. Apar. Rec. (g/cc)	Masa del carbón (g) / Volumen del carbón ocupado (mL)
D. Apar. Seca (g/cc)	Densidad Aparente recibida X [1 – (CH%/100)]
Carbono Fijo (%)	Es el residuo del análisis del contenido de materia móvil. Materia Residente, que incluye tanto al Carbono Residente como al Hidrógeno y Oxígeno Residente. El contenido de Carbono Fijo se determina restando a 100 la suma de los porcentajes del material volátil y cenizas, todos referidos en base seca. CF = 100 – (Vol + Cz) CF = carbono Fijo expresado en porcentaje. Vol = cantidad de Material Volátil expresada en porcentaje. Cz = cantidad de Ceniza expresada en porcentaje.

FUENTE: Laboratorio de Análisis de suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF)

ANEXO 3: Resultados del modelo estadístico: Análisis de componentes principales para biomasa y biochar

Autovectores

Variables	e1	e2
pH (1:1)	-0.33	0.17
C.E. (1:1) dS/m	0.38	-0.04
CaCO3 %	0.02	-0.45
Carbono Retenido (Tn/ha)	-0.11	0.37
COT %	-0.02	0.49
N %	-0.38	0.08
P (ppm)	0.05	0.25
K (ppm)	-0.02	-0.25
CIC (meq/100g)	0.09	0.44
B (ppm)	0.33	0.09
Cu (ppm)	-0.38	-0.14
Fe (ppm)	-0.37	0.11
Mn (ppm)	-0.28	-0.17
Zn (ppm)	-0.32	-0.03

Los valores más altos hacia arriba o hacia abajo, explican con mayor claridad en los ejes las relaciones.

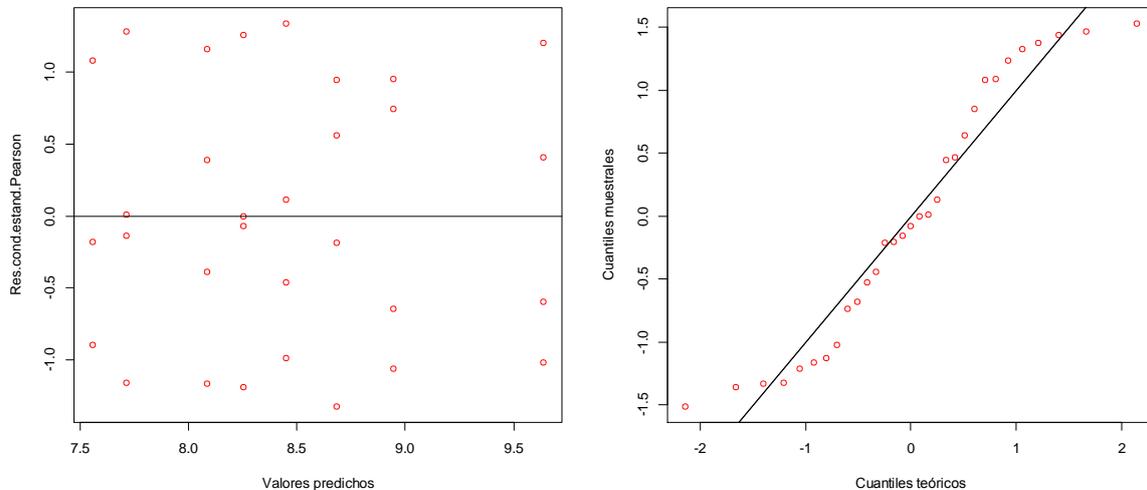
Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	6.18	0.44	0.44
2	3.27	0.23	0.67
3	1.69	0.12	0.80
4	1.04	0.07	0.87
5	0.75	0.05	0.92
6	0.59	0.04	0.97
7	0.28	0.02	0.99
8	0.20	0.01	1.00
9	0.00	0.00	1.00
10	0.00	0.00	1.00
11	0.00	0.00	1.00
12	0.00	0.00	1.00
13	0.00	0.00	1.00
14	0.00	0.00	1.00

Los dos ejes principales 1(X) y 2(Y) explican el 67% de la variabilidad total

ANEXO 4: Resultados del modelo estadístico: Rendimiento en peso de granos de mazorca (t ha⁻¹)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	117.59	135.75	-42.79	1.65	0.19	

AIC y BIC menores implica mejor

El valor de R² 0.19 es bajo porque son modelos mixtos.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	849.53	<0.0001
TRATAMIENTO	7	1.00	0.4592

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Formula: ~ 1 | TRATAMIENTO

RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 5: Cálculo de rendimientos ajustados a la humedad (CIMMYT)

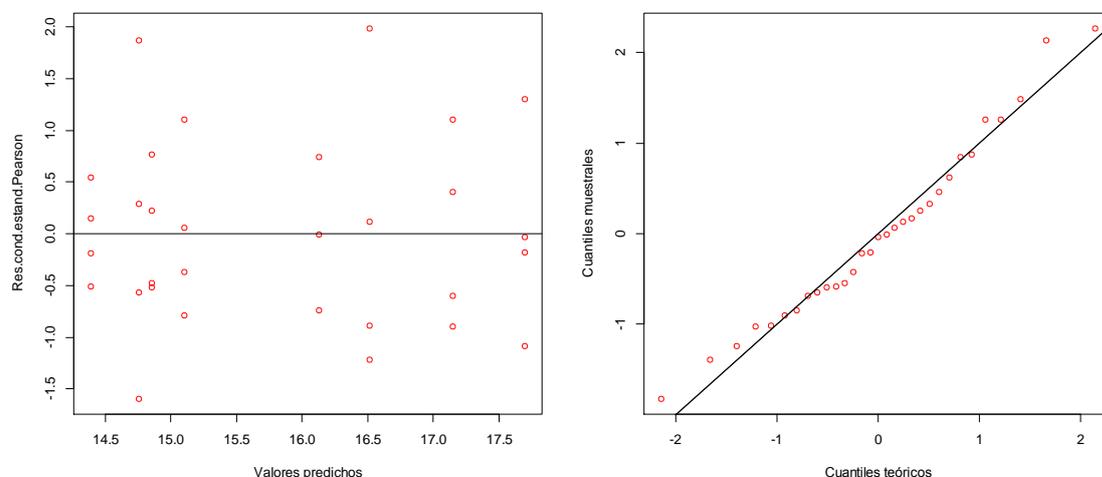
Plot	TRATAMIENTOS	PESO DE CAMPO	# DE PLANTAS COSECHADAS	# DE PLANTAS POR PARCELA	PESO AJUSTADO # DE PTS	DIFERENCIA DE PESO	20%	PESO AJUSTADO -20%	PESO DE 3 MAZORCAS	PESO DE GRANO	DESGRANE	HUMEDAD DE COSECHA	MATERIA SECA	HUMEDAD DESEADA/AREA DE PARCELA	RENDIMIENTO EN TONELAS POR HECTAREA	
1	PR-COR*RAM	6.700	24	32	8.9	2.233	0.4466	8.487	805	659	0.819	24.5	0.755	1000	445.44	11.78
2	BLANCO	5.150	19	32	8.7	3.524	0.7047	7.969	684	558	0.816	25.3	0.75	1000	445.44	10.90
3	PR-COR	5.750	22	32	8.4	2.614	0.5227	7.841	888	742	0.836	30.3	0.70	1000	445.44	10.25
4	FERTILIZADO	5.550	24	32	7.4	1.850	0.37	7.03	645	544	0.843	25.4	0.75	1000	445.44	9.93
5	PL-COR	5.900	25	32	7.6	1.652	0.3304	7.222	987	775	0.785	31.2	0.69	1000	445.44	8.76
6	PL-RAM	5.450	24	32	7.3	1.817	0.3633	6.903	853	681	0.798	30.1	0.70	1000	445.44	8.65
7	PL-COR*RAM	4.950	24	32	6.6	1.650	0.33	6.27	850	691	0.813	27.9	0.72	1000	445.44	8.25
8	PR-RAM	5.950	24	32	7.9	1.983	0.3966	7.537	826	689	0.834	26.6	0.73	1000	445.44	10.36
9	PL-RAM	5.600	23	32	7.8	2.191	0.4382	7.353	733	590	0.805	26.5	0.74	1000	445.44	9.77
10	FERTILIZADO	4.250	23	32	5.9	1.663	0.3326	5.58	875	729	0.833	28.3	0.72	1000	445.44	7.48
11	PR-COR	5.800	25	32	7.4	1.624	0.3248	7.099	869	737	0.848	28.9	0.71	1000	445.44	9.61
12	PL-COR*RAM	5.750	26	32	7.1	1.327	0.2653	6.812	932	727	0.780	31.3	0.69	1000	445.44	8.19
13	BLANCO	4.300	22	32	6.3	1.955	0.3909	5.864	693	542	0.782	30.7	0.69	1000	445.44	7.13
14	PL-COR	6.010	26	32	7.4	1.387	0.2773	7.12	851	682	0.801	28.0	0.72	1000	445.44	9.22
15	PR-COR*RAM	5.400	26	32	6.6	1.246	0.2492	6.397	797	664	0.833	28.3	0.72	1000	445.44	8.58
16	PR-RAM	5.050	25	32	6.5	1.414	0.2828	6.181	654	550	0.841	26.3	0.74	1001	445.44	8.61
17	FERTILIZADO	4.700	24	32	6.3	1.567	0.3133	5.953	709	575	0.811	28.8	0.71	1002	445.44	7.73
18	PR-COR	4.350	25	32	5.6	1.218	0.2436	5.324	850	679	0.799	32.1	0.68	1003	445.44	6.50
19	PL-RAM	4.600	27	32	5.5	0.852	0.1703	5.281	939	768	0.818	34.3	0.66	1004	445.44	6.40
20	PR-COR*RAM	4.950	24	32	6.6	1.650	0.33	6.27	968	783	0.809	31.6	0.68	1005	445.44	7.83
21	PL-COR	4.850	24	32	6.5	1.617	0.3233	6.143	790	648	0.820	24.1	0.76	1006	445.44	8.64
22	PR-RAM	4.500	25	32	5.8	1.260	0.252	5.508	840	694	0.826	31.6	0.68	1007	445.44	7.04

23	BLANCO	3.750	25	32	4.8	1.050	0.21	4.59	1036	790	0.763	31.3	0.69	1008	445.44	5.44
24	PL-COR*RAM	4.350	24	32	5.8	1.450	0.29	5.51	849	676	0.796	27.9	0.72	1009	445.44	7.17
25	PR-COR	5.100	24	32	6.8	1.700	0.34	6.46	802	666	0.830	31.1	0.69	1010	445.44	8.38
26	PL-COR	4.900	24	32	6.5	1.633	0.3266	6.207	769	659	0.857	24.1	0.76	1011	445.44	9.16
27	FERTILIZADO	3.500	24	32	4.7	1.167	0.2333	4.433	781	619	0.793	28.3	0.72	1012	445.44	5.72
28	PL-RAM	4.800	24	32	6.4	1.600	0.32	6.08	800	627	0.784	30.6	0.69	1013	445.44	7.52
29	PR-RAM	4.500	24	32	6.0	1.500	0.3	5.7	688	551	0.801	25.0	0.75	1014	445.44	7.79
30	BLANCO	6.000	25	32	7.7	1.680	0.336	7.344	1048	865	0.825	26.9	0.73	1015	445.44	10.10
31	PL-COR*RAM	5.550	24	32	7.4	1.850	0.37	7.03	931	753	0.809	27.5	0.73	1016	445.44	9.40
32	PR-COR*RAM	6.250	25	32	8.0	1.750	0.35	7.65	791	657	0.831	28.6	0.71	1017	445.44	10.36

FUENTE: Programa del Maíz INIAP-Austro

ANEXO 6: Resultados del modelo estadístico: Rendimiento en peso de choclo en estado pastoso ($t\ ha^{-1}$)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	125,70	135,92	-53,85	1,99	0,31	

AIC y BIC menores implica mejor

El valor de R^2 0.31 es bajo porque son modelos mixtos.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1945,21	<0,0001
TRATAMIENTO	7	1,51	0,2132

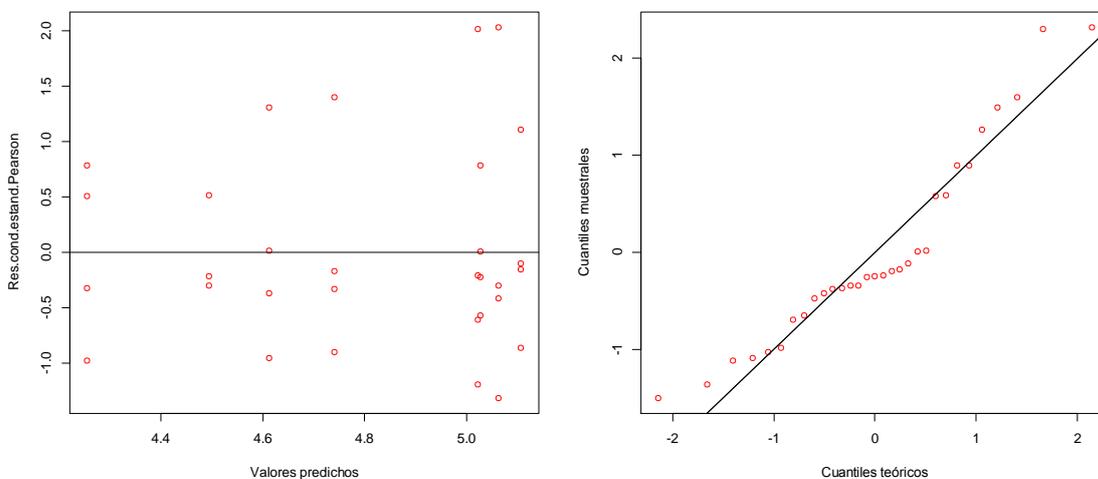
RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 7: Resultados del modelo estadístico para el índice de área foliar (IAF)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	68,95	79,17	-25,48	0,58	0,26	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	2101,22	<0,0001
TRATAMIENTO	7	1,14	0,3718

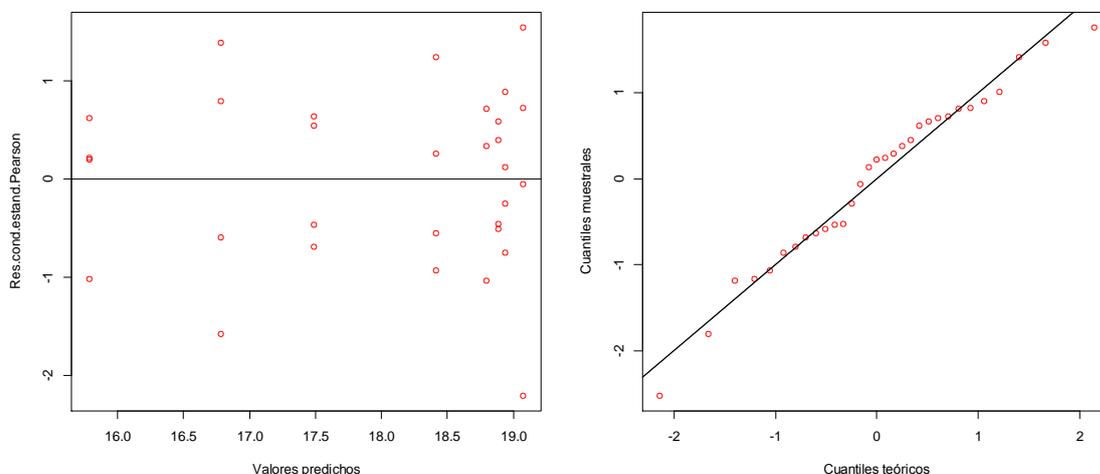
RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 8: Resultados del modelo estadístico para Peso de biomasa en materia seca (MS) ($t\ ha^{-1}$)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	126,68	136,90	-54,34	2,03	0,30	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	2417,05	<0,0001
TRATAMIENTO	7	1,40	0,2513

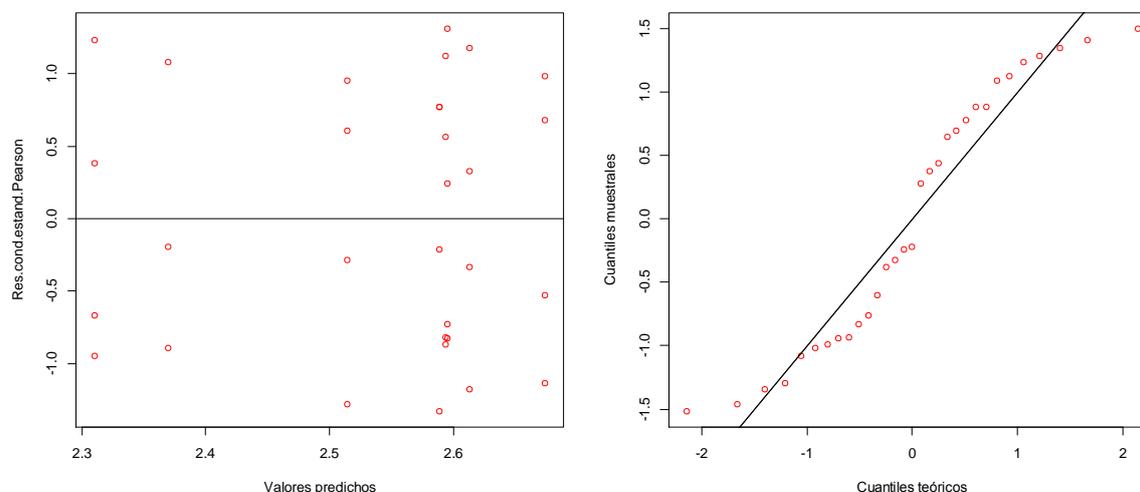
RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 9: Resultados del modelo estadístico para altura de plantas (m)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	14.31	32.48	8.84	0.05	0.36	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	6486.30	<0.0001
TRATAMIENTO	7	4.02	0.0052

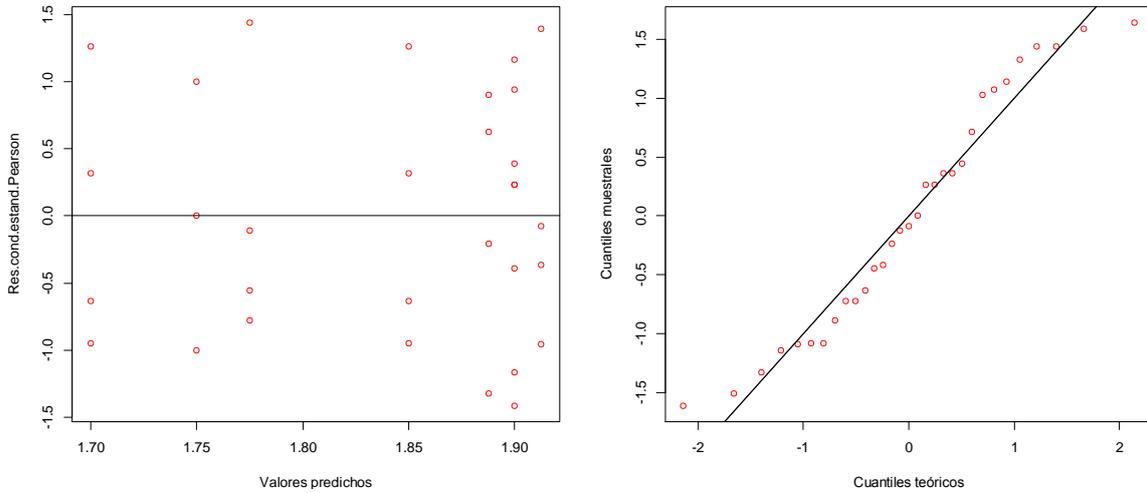
RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 10: Resultados del modelo estadístico para diámetro de plantas (cm)

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
31	25.28	43.45	3.36	0.17	0.21	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	3633.42	<0.0001
TRATAMIENTO	7	1.12	0.3820

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: *varIdent*
Formula: $\sim 1 \mid \text{TRATAMIENTO}$

RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

ANEXO 11: Resultados del modelo estadístico: Análisis de componentes principales para N-P-K en grano

Variables de clasificación

Autovectores

<u>Variab</u> les	<u>e1</u>	<u>e2</u>
NITRÓGENO%	0,65	-0,33
FÓSFORO%	0,36	0,93
POTASIO%	0,67	-0,18

Autovalores

<u>Lambda</u>	<u>Valor</u>	<u>Proporción</u>	<u>Prop</u>	<u>Acum</u>
1	1,81	0,60		0,60
2	0,89	0,30		0,90
3	0,31	0,10		1,00

Los dos ejes principales 1(X) y 2(Y) explican el 90% de la variabilidad total

ANEXO 12: Resultados del modelo estadístico: Análisis de componentes principales para el análisis químico de suelos

VARIABLES DE CLASIFICACIÓN

Autovectores

Variables	e1	e2
pH (1:1)	-0.33	0.17
C.E. (1:1) dS/m	0.38	-0.04
CaCO ₃ %	0.02	-0.45
Carbono Retenido (Tn/ha)	-0.11	0.37
COT %	-0.02	0.49
N %	-0.38	0.08
P (ppm)	0.05	0.25
K (ppm)	-0.02	-0.25
CIC (meq/100g)	0.09	0.44
B (ppm)	0.33	0.09
Cu (ppm)	-0.38	-0.14
Fe (ppm)	-0.37	0.11
Mn (ppm)	-0.28	-0.17
Zn (ppm)	-0.32	-0.03

Los valores más altos hacia arriba o hacia abajo, (resaltados), explican en los ejes con mayor claridad las relaciones.

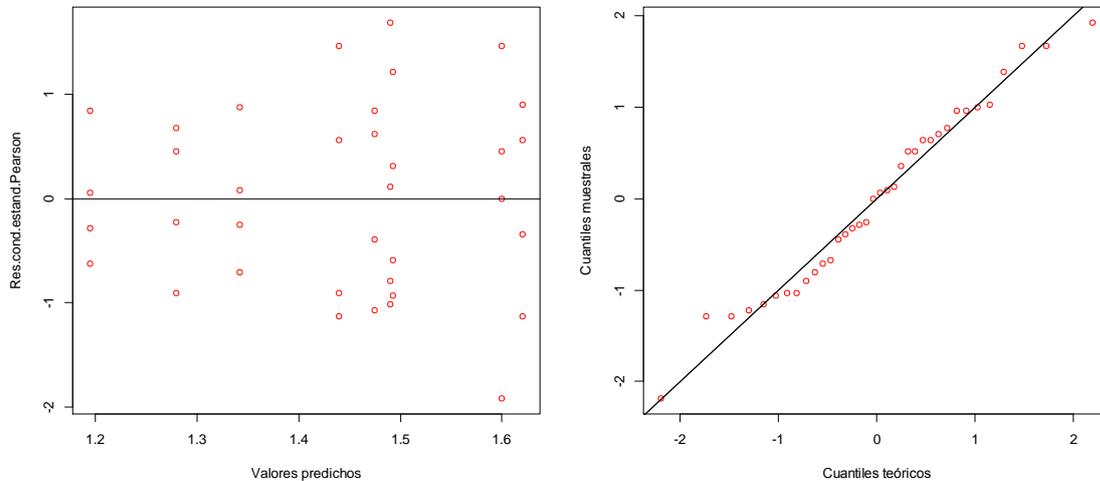
Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	6.18	0.44	0.44
2	3.27	0.23	0.67
3	1.69	0.12	0.80
4	1.04	0.07	0.87
5	0.75	0.05	0.92
6	0.59	0.04	0.97
7	0.28	0.02	0.99
8	0.20	0.01	1.00
9	0.00	0.00	1.00
10	0.00	0.00	1.00
11	0.00	0.00	1.00
12	0.00	0.00	1.00
13	0.00	0.00	1.00
14	0.00	0.00	1.00

Los dos ejes principales 1(X) y 2(Y) explican el 67% de la variabilidad total

ANEXO 13: Resultados del modelo estadístico para densidad aparente y porosidad del suelo

Supuestos estadísticos: Homogeneidad de varianzas y distribución normal de los residuales.



El ploteo de los datos cumple los supuestos de:

- 1.- Hay un patrón aleatorio, por lo tanto, hay homogeneidad de varianzas
- 2.- Se observa una distribución normal del error,
 - Por lo tanto, el modelo para el análisis es válido.

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
36	-9.82	13.50	22.91	0.08	0.75	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1 9508.74	<0.0001
TRATAMIENTO	8 15.11	<0.0001

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: *varIdent*
 Formula: $\sim 1 \mid \text{TRATAMIENTO}$

RESPUESTA - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: *No*

ANEXO 14: Costos de producción de maíz variedad *Mishqui Sara*

LABOR O ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	V.UNITARIO	V. TOTAL
1.Preparación de suelo				
Análisis de suelo	Análisis	1	35,00	35,00
Arada	hora	4	20,00	80,00
Rastrada	hora	2	20,00	40,00
Surcada	hora	2	20,00	40,00
Subtotal				195,00
2.Siembra				
Semilla	kg	32	3,00	96,00
Glifosato	litro	3	9,50	28,50
Gesaprin	kg	2,5	12,00	30,00
Semevin	litro	0,25	40,00	10,00
Acefato	kg	0,5	32,00	16,00
Lorsban	litro	2	16,00	32,00
Aceite vegetal	litro	2	2,00	4,00
Subtotal				216,50
3.Fertilización				
10-30-10	Saco	4	30,00	120,00
Urea	Saco	4	25,00	100,00
Muriato de potasio	Saco	2	37,00	74,00
Subtotal				294,00
4.Mano de obra				
Siembra	Jornal	8	10,00	80,00
Aplicaciones de abonos	Jornal	2	10,00	20,00
Aplicación de aceite	Jornal	3	10,00	30,00
Labores culturales	Jornal	10	10,00	100,00
Riegos	Jornal	6	10,00	60,00
Aplicación de Herbicidas e Insecticidas	Jornal	3	10,00	30,00
Purificación de lote	Jornal	4	10,00	40,00
Subtotal				360,00
5.Cosecha				
Cosecha	Jornal	10	10,00	100,00
Transporte	Flete	2	150,00	300,00
Beneficio	Quintal	100	7,00	700,00
Saquillos	Unidad	250	0,30	75,00
Subtotal				1175,00
COSTOS DIRECTOS				2240,50
Imprevistos 10%				224,05
Costos de capital 12%				268,86
TOTAL COSTOS INDIRECTOS				492,91
			COSTO TOTAL POR HECTÁREA	2733,41

FUENTE: Programa del Maíz INIAP-Austro