



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE LA
PODA DE ÁRBOLES DEL CANTÓN CUENCA
MEDIANTE EL ANÁLISIS TGA, ELEMENTAL Y PODER
CALÓRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR: JENNIFER GABRIELA MEDINA PINOS

DIRECTOR: ING. MANUEL ALVAREZ-VERA, Ph.D.

CUENCA – ECUADOR

2020

*No me gradúe en los
50 años de La Cato!*



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE LA PODA DE
ÁRBOLES DEL CANTÓN CUENCA MEDIANTE EL ANÁLISIS TGA,
ELEMENTAL Y PODER CALÓRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOCHAR

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR: JENNIFER GABRIELA MEDINA PINOS

DIRECTOR: ING. MANUEL ALVAREZ-VERA, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

2020

*Yo me gradúe en los
50 años de La Cato!*

DECLARACIÓN

Yo, Jennifer Gabriela Medina Pinos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



Jennifer Gabriela Medina Pinos

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jennifer Gabriela Medina Pinos, bajo mi supervisión.



ING. MANUEL ALVAREZ-VERA, Ph.D.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al tutor de este trabajo de titulación, Ing. Álvarez-Vera, Ph.D. por su guía y apoyo a lo largo de este tiempo. De igual forma, a los docentes de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Católica de Cuenca por haberme brindado sus conocimientos a lo largo de toda la carrera universitaria y preparado profesionalmente.

Agradezco al departamento de Relaciones Internacionales de la Universidad Católica de Cuenca, por el apoyo en la gestión que se efectuó para realizar el trabajo de titulación en conjunto con el Laboratorio de energías renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina en Lima-Perú, de igual manera un agradecimiento a esta institución que me ofreció todo su apoyo y colaboración en la realización de esta investigación.

Agradezco a mis padres y hermana por ser los principales promotores de mis sueños, por creer en mis expectativas, consejos, valores y principios que me han inculcado.

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi vida, en especial a mis padres quienes con su amor y esfuerzo han sido mi motivación para cumplir una meta más. A todas las personas que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE ANEXOS	XVII
RESUMEN	XVIII
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo General.	4
1.1.2 Objetivos Específicos.	4
1.2 Hipótesis	5
CAPÍTULO II	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Biomasa	6
2.1.1 Definición.	6
2.1.2 Aplicaciones.	6
2.1.3 Clasificación.	7
2.1.4 Ventajas del uso de la biomasa.	8
2.1.5 Necromasa.	8
2.2 Biomasa lignocelulósica	8
2.2.1 Definición.	8
2.2.2 Componentes.	9
2.2.3 Clasificación.	9
2.2.4 Beneficios y aplicaciones.	10
2.3 Zona urbana del cantón Cuenca	10
2.3.1 Especies arbóreas de la zona urbana.	11
2.3.2 Especie arbórea Molle (<i>Schinus molle</i>).	12
2.3.3 Especie arbórea Álamo blanco (<i>Populus alba</i>).	13
2.4 Biocarbón	13
2.4.1 Definición.	13
2.4.2 Características generales.	14
2.4.3 Beneficios ambientales.	14
2.4.4 Biocarbón en el Ecuador.	16
2.4.5 Producción de biocarbón.	16

2.5	Método de torrefacción	16
2.5.1	Definición.	16
2.5.2	Características generales.	17
2.5.3	Factores que influyen en la torrefacción.	18
2.6	Pirólisis	19
2.6.1	Pirólisis lenta.	20
2.6.2	Pirólisis rápida.	20
2.7	Análisis para la caracterización	21
2.7.1	Análisis elemental o último.	21
2.7.2	Análisis Termogravimétrico (TGA) o proximal.	21
2.7.3	Análisis de poder calórico.	22
CAPÍTULO III		24
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Zona de estudio	24
3.2	Población y muestra de estudio	24
3.2.1	Población.	24
3.2.2	Muestras de estudio	27
3.3	Materiales y equipos	28
3.3.1	Materiales para la recolección de la biomasa.	28
3.3.2	Materiales para el acondicionamiento de las muestras.	28
3.3.3	Materiales y equipos para la caracterización de la biomasa y biocarbón.	28
3.3.4	Materiales y equipos para la producción de biocarbón.	29
3.3.5	Materiales y equipos para las pruebas de crecimiento con plántulas	29
3.4	Metodología	30
3.4.1	Desarrollo metodológico.	30
3.4.2	Acondicionamiento de la materia prima.	33
3.4.3	Preparación de la materia prima para los análisis de laboratorio.	34
3.4.1	Análisis elemental: CHN (carbono total, hidrógeno total y nitrógeno).	35
3.4.4	Análisis elemental: oxígeno.	36
3.4.5	Análisis elemental: azufre.	37
3.4.6	Análisis Termogravimétrico (TGA).	38
3.4.7	Análisis de poder calórico.	39
3.4.8	Relación Carbono - Nitrógeno (C / N).	40
3.4.9	Metodología aplicada para la producción de biocarbón	41
3.4.10	Método de torrefacción.	41
3.4.11	Rendimiento másico del biocarbón.	43
3.4.12	Diseño experimental de los ensayos para el crecimiento de las plántulas.	43
3.4.13	Ensayos efectuados para analizar el crecimiento de las plántulas de girasol.	44
3.4.14	Preparación de diluciones.	44
3.4.15	Formación de las unidades experimentales.	45

3.4.16	Registro de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol.	47
3.4.17	Métodos estadísticos aplicados	51
CAPÍTULO IV		53
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1	Caracterización química y análisis estadístico de la biomasa	53
4.1.1	Carbono total.	54
4.1.2	Hidrógeno total.	56
4.1.3	Oxígeno.	58
4.1.4	Nitrógeno.	60
4.1.5	Azufre.	62
4.2	Caracterización física y análisis estadístico de la biomasa	64
4.2.1	Humedad.	66
4.2.2	Contenido volátil.	68
4.2.3	Cenizas.	69
4.2.4	Carbono fijo.	71
4.3	Poder calórico de la biomasa residual	72
4.3.1	Poder calórico superior (PCS).	73
4.3.2	Poder calórico inferior (PCI).	74
4.4	Relación Carbono – Nitrógeno (C / N) de la biomasa	76
4.5	Producción de biocarbón	77
4.6	Caracterización química y análisis estadístico del biocarbón.	79
4.6.1	Carbono total.	81
4.6.2	Hidrógeno total.	83
4.6.3	Oxígeno.	84
4.6.4	Nitrógeno.	86
4.6.5	Azufre.	89
4.7	Caracterización física y análisis estadístico del biocarbón	90
4.7.1	Humedad.	91
4.7.2	Contenido volátil.	93
4.7.3	Cenizas.	95
4.7.4	Carbono fijo.	97
4.8	Poder calórico del biocarbón	98
4.8.1	Poder calórico superior (PCS).	99
4.8.2	Poder calórico inferior (PCI).	100
4.9	Relación Carbono – Nitrógeno del biocarbón	102
4.10	Resultados de los ensayos experimentales de las plántulas de girasol.	103
CAPÍTULO V		108
5.	CONCLUSIONES	108
CAPÍTULO VI		110
6.	RECOMENDACIONES	110

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
ANEXOS	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Especie vegetal molle (<i>Schinus molle</i>) _____	12
Figura 2: Especie vegetal álamo blanco (<i>Populus alba</i>) _____	13
Figura 3: Beneficios del biocarbón en el suelo y plantas _____	15
Figura 4: Transformación de la biomasa en el proceso de torrefacción _____	17
Figura 5: Descomposición de la biomasa por efectos del calor de combustión _____	19
Figura 6: Mapa de ubicación del cantón Cuenca _____	24
Figura 7: Mapa de las áreas verdes de la ciudad de Cuenca _____	25
Figura 8: Ubicación de los parques donde se recolectó la biomasa residual de estudio _____	25
Figura 9: Parque Inclusivo Circo social _____	26
Figura 10: Parque Miraflores _____	26
Figura 11: Parque el Paraíso _____	27
Figura 12: Muestras recolectadas de la biomasa de álamo blanco (a) y molle (b) _____	27
Figura 13: Procedimiento para la caracterización física de la biomasa residual _____	31
Figura 14: Procedimiento para la caracterización química de la biomasa residual _____	31
Figura 15: Procedimiento para la producción y caracterización del biocarbón _____	32
Figura 16: Muestras de biomasa de las especies de álamo blanco (a) y molle (b) _____	34
Figura 17: Limaduras de la biomasa residual de las especies de álamo blanco (a) y molle (b) _____	34
Figura 18: Analizador elemental LECO Series CHN 628 _____	35
Figura 19: Pesaje de las muestras de estudio para el análisis elemental CHN _____	35
Figura 20: Rueda rotatoria del analizador elemental con las muestras pesadas _____	36
Figura 21: Pesaje de las muestras para el análisis de oxígeno (a) y muestras obtenidas (b) _____	36
Figura 22: Módulo de micro-oxígeno LECO Series 628 _____	37
Figura 23: Módulo de azufre LECO Series 628 _____	37
Figura 24: Pesaje de muestras para el análisis de azufre (a), muestras antes (b) y después del proceso de análisis (c) _____	37
Figura 25: Colocación de las muestras en el módulo de azufre _____	38
Figura 26: Módulo termogravimétrico TGA 701 _____	38
Figura 27: Pesaje de las muestras de materia prima en el módulo termogravimétrico _____	39
Figura 28: Pesaje de muestras para el análisis de poder calórico _____	39
Figura 29: Colocación de la muestra en el vaso de combustión _____	39
Figura 30: Estación de carga y despresurización de oxígeno _____	40
Figura 31: Calorímetro semi-automático LECO AC600 _____	40
Figura 32: Biocarbón de álamo blanco (a) y molle (b) _____	42
Figura 33: Diseño del croquis de las unidades experimentales _____	44
Figura 34: Proceso de formación de la dilución 1:10 con biocarbón de álamo blanco _____	45
Figura 35: Proceso de formación de la dilución 1:10 con biocarbón de molle _____	45
Figura 36: Proceso de formación de la dilución 1:5 con biocarbón de álamo blanco _____	45
Figura 37: Proceso de formación de la dilución 1:5 con biocarbón de álamo blanco _____	45
Figura 38: Distribución de las semillas en cada unidad experimental _____	46

Figura 39: Unidades experimentales con sus respectivos tipos de sustratos _____	46
Figura 40: Germinación de las semillas de girasol (<i>Helianthus annuus</i>) en la primera semana __	47
Figura 41: Medición del tallo para el registro de la tasa de crecimiento semanal _____	49
Figura 42: Crecimiento de las plántulas de girasol (<i>Helianthus annuus</i>) en la segunda semana de experimentación _____	50
Figura 43: Crecimiento de las plántulas de girasol (<i>Helianthus annuus</i>) en la cuarta semana de experimentación _____	50
Figura 44: Crecimiento de las plántulas de girasol (<i>Helianthus annuus</i>) al final de la experimentación en la octava semana de experimentación _____	51
Figura 45: Box-plot de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	55
Figura 46: Error estándar (EE) de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	56
Figura 47: Box-plot de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	57
Figura 48: Error estándar (EE) de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	58
Figura 49: Box-plot de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	59
Figura 50: Error estándar (EE) de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	60
Figura 51: Box-plot de los porcentajes de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	61
Figura 52: Error estándar (EE) del contenido de nitrógeno total en porcentaje de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	62
Figura 53: Box-plot de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	63
Figura 54: Error estándar (EE) de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	64
Figura 55: Box-plot de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	66
Figura 56: Error estándar (EE) de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	67
Figura 57: Box-plot de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	68
Figura 58: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	69
Figura 59: Box-plot del contenido de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle _	70
Figura 60: Error estándar (EE) de los porcentajes de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	71

Figura 61: Box-plot de los porcentajes de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	71
Figura 62: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	72
Figura 63: Box-plot del contenido de poder calórico superior de la biomasa residual de álamo blanco y molle en Cal / g _____	73
Figura 64: Error estándar (EE) del poder calórico superior de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	74
Figura 65: Box-plot del contenido de poder calorífico inferior de la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	75
Figura 66: Error estándar (EE) del poder calórico inferior en la biomasa residual de álamo blanco y molle _____	76
Figura 67: Limaduras de biomasa y biocarbón de la especie de molle y álamo blanco _____	78
Figura 68: Variación de las curvas termogravimétricas durante el análisis TGA del (a) biocarbón de álamo blanco y (b) biocarbón de molle _____	79
Figura 69: Box-plot de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle	81
Figura 70: Error estándar (EE) de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	82
Figura 71: Box-plot de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle	83
Figura 72: Error estándar (EE) de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	84
Figura 73: Box-plot de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	85
Figura 74: Error estándar (EE) de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	86
Figura 75: Box-plot de los porcentajes de nitrógeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	87
Figura 76: Error estándar (EE) de los porcentajes de nitrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	88
Figura 77: Box-plot de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle _____	89
Figura 78: Error estándar (EE) de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle _____	90
Figura 79: Box-plot de los porcentajes de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle _____	92
Figura 80: Error estándar (EE) del contenido de humedad en el biocarbón de álamo blanco y molle _____	93
Figura 81: Porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle _____	93
Figura 82: Error estándar (EE) del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle _____	94
Figura 83: Box-plot del contenido de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle _____	95
Figura 84: Error estándar (EE) de los porcentajes de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle _____	96
Figura 85: Box-plot de los porcentajes de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle _____	97

Figura 86: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle _____	98
Figura 87: Box-plot del contenido de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g _____	99
Figura 88: Error estándar (EE) del contenido de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g _____	100
Figura 89: Box-plot del contenido de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal / g _____	101
Figura 90: Error estándar (EE) del contenido de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g _____	102
Figura 91: Tasa de crecimiento semanal del tallo con respecto a los tratamientos y los tipos de biocarbón _____	105
Figura 92: Gráfico del análisis estadístico ANOVA _____	106
Figura 93: Gráficos de interacción sobre la tasa de crecimiento del tallo _____	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Especies más abundantes en el arbolado urbano de la zona urbana del cantón Cuenca	11
Tabla 2: Taxonomía de la especie vegetal molle (<i>Schinus molle</i>)	12
Tabla 3: Taxonomía de la especie vegetal álamo blanco (<i>Populus alba</i>)	13
Tabla 4: Rendimientos aproximados de los productos (base madera seca) obtenidos en diferentes formas de pirólisis	20
Tabla 5: Descripción de los parques para la obtención de la biomasa	26
Tabla 6: Materiales para la obtención de las muestras de biomasa residual	28
Tabla 7: Materiales para la preparación y acondicionamiento de las muestras de álamo blanco y molle	28
Tabla 8: Materiales y equipos para los análisis de caracterización de la biomasa y biocarbón	29
Tabla 9: Materiales y equipos utilizados para la producción del biocarbón	29
Tabla 10: Materiales y equipos para realizar los ensayos de germinación y crecimiento	30
Tabla 11: Normas aplicadas para la caracterización de la biomasa y biocarbón	33
Tabla 12: Peso inicial en (g) de la biomasa residual de álamo blanco para obtener biocarbón	42
Tabla 13: Peso inicial en (g) de la biomasa residual de molle utilizada para obtener el biocarbón	43
Tabla 14: Concentración y tipo de dosis para las diluciones	44
Tabla 15: Codificación de las unidades experimentales	46
Tabla 16: Registro de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol en (cm)	48
Tabla 17: Resultados del análisis elemental de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje	53
Tabla 18: Resultados del análisis elemental de la biomasa residual de molle en porcentaje	53
Tabla 19: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química de la biomasa de álamo blanco	54
Tabla 20: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química de la biomasa de molle	54
Tabla 21: Porcentajes del contenido de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle	54
Tabla 22: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle	55
Tabla 23: Porcentajes del contenido de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle	56
Tabla 24: Análisis descriptivo de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle	57
Tabla 25: Porcentajes del contenido de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle	58
Tabla 26: Análisis descriptivo de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle	59
Tabla 27: Porcentajes del contenido de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle	60

Tabla 28: Análisis descriptivo de los porcentajes de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle	61
Tabla 29: Porcentajes del contenido de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle	62
Tabla 30: Análisis descriptivo de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle	63
Tabla 31: Resultados del análisis termogravimétrico de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje	65
Tabla 32: Resultados del análisis termogravimétrico de la biomasa residual de molle en porcentaje	65
Tabla 33: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización física de la biomasa de álamo blanco	65
Tabla 34: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización física de la biomasa de molle	65
Tabla 35: Porcentajes del contenido de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle	66
Tabla 36: Análisis descriptivo de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle	67
Tabla 37: Porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle	68
Tabla 38: Análisis descriptivo de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle	69
Tabla 39: Porcentajes del contenido de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle	69
Tabla 40: Análisis descriptivo de los porcentajes de ceniza de la biomasa residual de álamo blanco y molle	70
Tabla 41: Contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle en porcentaje	71
Tabla 42: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle	72
Tabla 43: Resultados del poder calórico superior aplicado a la biomasa residual de estudio en Cal/g	73
Tabla 44: Análisis descriptivo de los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico superior en Cal/g	73
Tabla 45: Resultados del poder calórico inferior aplicado a la biomasa residual de estudio en Cal/g	74
Tabla 46: Análisis descriptivo de los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico inferior en Cal/g	75
Tabla 47: Resultados del análisis de la relación C / N en porcentaje	76
Tabla 48: Producción del biocarbón a partir de la biomasa de álamo blanco y molle en (g)	77
Tabla 49: Resultados del análisis elemental aplicado al biocarbón de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje	80

Tabla 50: Resultados del análisis elemental aplicado al biocarbón de la biomasa residual de molle en porcentaje _____	80
Tabla 51: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química del biocarbón de álamo blanco _____	80
Tabla 52: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química del biocarbón de molle _____	80
Tabla 53: Porcentajes del contenido de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle ____	81
Tabla 54: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	81
Tabla 55: Porcentajes del contenido de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle	83
Tabla 56: Análisis descriptivo de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	83
Tabla 57: Porcentajes del contenido de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	85
Tabla 58: Análisis descriptivo de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	85
Tabla 59: Porcentajes del contenido de nitrógeno del biocarbón de álamo blanco y molle _____	86
Tabla 60: Análisis descriptivo de los porcentajes de nitrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle _____	87
Tabla 61: Porcentajes del contenido de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle _____	89
Tabla 62: Análisis descriptivo de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle _____	89
Tabla 63: Resultados del análisis termogravimétrico aplicado al biocarbón de álamo blanco en porcentaje _____	90
Tabla 64: Resultados del análisis termogravimétrico aplicado al biocarbón de molle en porcentaje _____	91
Tabla 65: Análisis descriptivo de la caracterización física del biocarbón de álamo blanco en porcentaje _____	91
Tabla 66: Análisis descriptivo de la caracterización física del biocarbón de molle en porcentaje	91
Tabla 67: Porcentajes del contenido de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle _____	91
Tabla 68: Análisis descriptivo de los porcentajes de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle _____	92
Tabla 69: Porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle _____	93
Tabla 70: Análisis descriptivo de los porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle _____	94
Tabla 71: Porcentajes del contenido de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle _____	95
Tabla 72: Análisis descriptivo de los porcentajes de ceniza del biocarbón de álamo blanco y molle _____	96
Tabla 73: Contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle en porcentaje _____	97

Tabla 74: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle _____	97
Tabla 75: Resultados del poder calórico superior aplicado a los tratamientos de estudio en Cal/g	99
Tabla 76: Análisis descriptivo de los resultados de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g _____	99
Tabla 77: Resultados del poder calórico inferior aplicado a los tratamientos de estudio en Cal/g	100
Tabla 78: Análisis descriptivo del de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g _____	101
Tabla 79: Resultados del análisis de la relación C / N en porcentaje del biocarbón _____	102
Tabla 80: Datos de la tasa de crecimiento semanal del tallo y repeticiones (en cm) de los tratamientos de estudio con relación a la Dosis I (1:10) _____	103
Tabla 81: Datos de la tasa de crecimiento semanal del tallo y repeticiones (en cm) de los tratamientos de estudio con relación a la Dosis II (1:5) _____	103
Tabla 82: Promedios de la tasa de crecimiento semanal (en cm) de los tratamientos en las ocho semanas de experimentación _____	104
Tabla 83: Análisis de varianza de los datos del crecimiento semanal del tallo _____	105
Tabla 84: Análisis de varianza de los datos del crecimiento semanal del tallo, con respecto a la dosis II y los tratamientos. _____	107

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Protocolo del Laboratorio de Energías Renovables, UNALM _____	117
Anexo 2: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la primera semana _____	118
Anexo 3: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la segunda semana _____	119
Anexo 4: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la tercera semana _____	121
Anexo 5: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la cuarta semana	122
Anexo 6: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la quinta semana	124
Anexo 7: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la sexta semana	125
Anexo 8: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la séptima semana _____	126
Anexo 9: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de <i>Helianthus annuus</i> en la octava semana _____	128

RESUMEN

La investigación consistió en la caracterización química y física de la biomasa residual arbórea de "*Populus alba*" y "*Schinus molle*", especies provenientes de las podas de las áreas verdes de la zona urbana del cantón Cuenca. Inicialmente, se analizó los resultados obtenidos de la caracterización de la biomasa y mediante la relación Carbono/Nitrógeno se determinó que las especies de estudio son viables para la producción de biocarbón. La caracterización de la biomasa y biocarbón se efectuó mediante el análisis elemental, poder calórico y termogravimétrico, para la elaboración del biocarbón se aplicó el método de torrefacción a 300 °C de temperatura, con el propósito de evaluar la efectividad del producto se realizó ensayos en semillas de girasol, para esto se aplicó diluciones con una dosis alta y baja de biocarbón. Finalmente, en el análisis estadístico se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de estudio, el biocarbón de álamo blanco presentó una mayor tasa de crecimiento semanal de la plántula con relación a la especie de molle y las diluciones con una dosis alta presentaron mayor efectividad en el desarrollo de las plantas.

PALABRAS CLAVE: BIOCARBÓN, PIRÓLISIS, TORREFACCIÓN, BIOMASA RESIDUAL, SEMILLA DE GIRASOL.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los recursos ecosistémicos de abastecimiento, regulación, apoyo y culturales, desempeñan un papel muy importante para la subsistencia de todos los seres vivos, por esta razón es fundamental velar por los recursos naturales como la biodiversidad, agua, aire y suelo, debido a que un ecosistema ecológicamente equilibrado es esencial para asegurar el buen vivir de la humanidad y de todos los seres vivos. Sin embargo, en el Ecuador existen varios problemas ambientales que afectan al proceso natural de los mismos, entre estos se encuentra el manejo de los recursos ecosistémicos, la deforestación y en algunos lugares del país la falta de gestión de los residuos sólidos (Organización Alianza, 2014).

Para que los recursos naturales presenten sustentabilidad y sostenibilidad se deben considerar los siguientes criterios, el primero es utilizar los recursos naturales renovables a su capacidad de regeneración natural, el segundo criterio trata sobre el uso de los recursos naturales no renovables a su tasa de sustitución por recursos naturales renovables y por último, emitir la cantidad de desechos que los ecosistemas sean capaces de absorber (Puentestar, 2015). Por ello, se trata de obtener nuevos avances tecnológicos amigables con el medio ambiente y métodos para la transformación o aprovechamiento de los residuos sólidos, con el fin de disminuir la producción de gases de efecto invernadero que se obtienen como resultado de la quema de los combustibles fósiles y de residuos sólidos (Jara, 2015).

Por otro lado, el crecimiento poblacional ha ocasionado un incremento en la generación de los residuos sólidos, los mismos que son depositados en algunos casos de forma directa en ríos, quebradas o en sitios baldíos sin tratamiento alguno, creando impactos en el medio ambiente y problemas de salud en la población (Cevallos et al., 2014). En el cantón Cuenca se recolectan alrededor de 15 000 toneladas de residuos sólidos urbanos al mes, donde 115 toneladas corresponden a residuos que pueden ser reutilizados, además el Relleno Sanitario de Pichacay ubicado en la parroquia Santa Ana a 21 km de la ciudad recibe diariamente alrededor de 500 toneladas de residuos sólidos urbanos, más del 50% de los residuos que se desechan son orgánicos (García, 2019).

En el Código Orgánico del Ambiente (COA) Libro tercero de la Calidad Ambiental, Título V Gestión integral de residuos y desechos, Capítulo I Disposiciones generales, Art. 226 indica que la gestión de los residuos y desechos deberá cumplir con la siguiente jerarquización: prevención, minimización de la generación en la fuente, aprovechamiento o

valorización, eliminación y disposición final, este último se limitará con aquellos desechos que no se pueden aprovechar, tratar, valorizar o eliminar en condiciones ambientales adecuadas o tecnológicamente factibles.

Entre los residuos sólidos orgánicos se tiene los residuos de podas o talas que se realizan por seguridad, salud o estética en las áreas verdes de la ciudad de Cuenca, estos restos pueden ser considerados como residuos lignocelulósicos o biomasa residual vegetal, que ofrecen la oportunidad de aprovechar y obtener una fuente de energía limpia y la posibilidad de aplicar la conversión de la materia prima para obtener otros productos mediante las transformaciones termoquímicas de la biomasa, con esta práctica se trata de reducir la cantidad de desechos que se depositan en el relleno sanitario (Herguedas et al., 2012). De acuerdo con las leyes del país reflejadas en la Constitución de la República del Ecuador, refiere que el estado promoverá al sector público o privado, el uso de tecnologías ambientalmente amigables y de energías alternativas de mínimo impacto para evitar la contaminación (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

La biomasa se puede considerar como un combustible no fósil y neutro desde el punto de vista del ciclo natural del carbono, por lo que las emisiones de dióxido de carbono que se generan al provenir de un carbono aislado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no perturba el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por lo tanto contribuye de forma efectiva su uso en la disminución de la generación de gases de efecto invernadero, en la actualidad la implementación de la biomasa puede ser considerada como una alternativa sostenible para la creación de nuevas tecnologías medioambientales (IMARTEC, 2014).

La biomasa que se forma a partir de los residuos lignocelulósicos cubre una amplia variedad de materiales orgánicos y es considerada como una mezcla compleja de polímeros, conocidos como lignina, hemicelulosa, celulosa y mínimas cantidades de otros componentes implícitos en la pared celular de las plantas, la biomasa permite obtener combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, a través de procesos bioquímicos, fisicoquímicos y termoquímicos (Al-Kassir, 2013).

Dentro de los métodos termoquímicos se encuentra el proceso de pirólisis, que se ha convertido en una técnica prometedora para la transformación de la biomasa en nuevos productos, como el biocarbón, el uso de este componente se puede considerar como una estrategia viable para el aprovechamiento de la biomasa residual de los sistemas agroforestales. El proceso de elaboración del biocarbón se origina en la transformación de la materia prima mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica, dependiendo del tipo de metodología el tiempo de exposición y temperatura pueden variar,

en el caso del método de torrefacción se produce biocarbón en un ambiente inerte, es decir sin presencia de oxígeno mediante el proceso de pirólisis entre 200 °C y 300 °C de temperatura, este proceso promueve un material rico en contenido de carbono y cenizas, que también se pueden devolver al suelo para mejorar las condiciones del mismo (Parra, 2016).

El trabajo “Caracterización de biomasa residual de la poda de árboles del cantón Cuenca mediante el análisis TGA, elemental y poder calórico para la producción de biochar”, tiene un enfoque de investigación experimental, donde se planteó la posibilidad de obtener un material que beneficie al medio ambiente, basado en la utilización de la biomasa residual conformada por ramas de las especies de álamo blanco (*Populus alba*) y molle (*Schinus molle*), que de acuerdo con la información proporcionada por el departamento de Áreas Verdes de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), las mismas se encuentran entre las especies con mayor abundancia, resiliencia y rápido crecimiento de las áreas verdes de la zona urbana del cantón Cuenca.

Por su parte, Minga & Verdugo (2016) expresan que en el centro urbano, en los lugares destinados para aéreas verdes como parques, parterres y jardines particulares, estas especies conjuntamente con otras como el eucalipto, urapán, sauce etc. se encuentran entre la vegetación que predomina. Con el propósito de reducir el nivel de residuos sólidos que se producen en la ciudad se identificó la posibilidad de aprovechar el uso de estos restos y transformarlos en biocarbón, para incorporarlo en el desarrollo de plantas de girasol e identificar la viabilidad del producto obtenido.

Para cumplir con la caracterización química de la biomasa se aplicó el análisis elemental, con el fin de analizar el contenido total de carbono, hidrógeno oxígeno, nitrógeno y azufre presentes en las muestras de naturaleza orgánica y sólida de las especies de estudio. Por otro lado, en la caracterización física se aplicó el análisis termogravimétrico (TGA) para obtener los datos de humedad, material volátil, carbono fijo, cenizas y la pérdida de masa que sobrellevó la muestra de biomasa residual con relación al aumento de la temperatura mientras se empleó el análisis, por último, se utilizó el parámetro del poder calórico para determinar la energía disponible en la biomasa.

Posteriormente, se procedió a realizar una comparación mediante la evaluación de las variables físicas, químicas y relación carbono-nitrógeno (C/N), donde se determinó las características y beneficios de cada una de las especies de estudio para la producción de biochar o también conocido como biocarbón. Por otro lado, la propuesta para la elaboración del biocarbón se basó en el método de torrefacción a 300 °C, donde la biomasa se pirolizó en un ambiente libre de oxígeno (Bermeo, 2018). Después se precedió a realizar la

caracterización del biocarbón, de igual forma mediante el análisis elemental, termogravimétrico y poder calórico.

Para analizar la viabilidad de los dos tipos de biocarbón obtenidos, se procedió a validar los mismos mediante pruebas de experimentación con diluciones, donde se empleó dos tipos de dosis que presentan una concentración alta (1:5) y baja (1:10) de biocarbón, con el fin de obtener el tipo de tratamiento y dosis que presentó mayor efectividad en la tasa de crecimiento semanal del tallo de las plántulas de girasol (*Helianthus annuus*), durante el tiempo de experimentación.

En el Ecuador la especie de girasol (*Helianthus annuus*) fue introducida hace algunas décadas por floricultores progresistas en busca de nuevas opciones, todavía se sigue cultivando esta especie en grandes y pequeñas extensiones (Carmigniani, 2017). Según, Chicaiza (2017) la semilla de girasol es consumida a gran escala en el Ecuador. Los cultivos de girasol (*Helianthus annuus*) se encuentran entre los cuatro cultivos de mayor producción enfocados en el aceite vegetal comestible y mundialmente ocupa el segundo lugar en el consumo de la población, de igual forma estas plantaciones purifican el aire y están siendo utilizadas para la fabricación de biocombustible (Perigó et al.,2015).

El biocombustible es una propuesta interesante para reemplazar el combustible actual por una alternativa amigable para el medio ambiente, también estos cultivos no generan residuos debido a que toda la planta puede ser utilizada, el tallo para hacer papel, las hojas son consideradas medicinales y las raíces como abono. Por todos los criterios anteriormente señalados se consideró la aplicación de esta especie en la investigación, debido a la importancia como fuente de energía renovable que presentan sus aplicaciones

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General.

Efectuar la caracterización química y física de la biomasa residual arbórea conformada por ramas de molle (*Schinus molle*) y álamo blanco (*Populus alba*), especies pertenecientes a la zona urbana del cantón Cuenca provincia del Azuay, para evaluar su viabilidad en la producción de biocarbón.

1.1.2 Objetivos Específicos.

- Realizar la caracterización química y física de la biomasa residual arbórea de estudio, mediante el análisis elemental, termogravimétrico y poder calórico.

- Producir biocarbón mediante el método de torrefacción para el aprovechamiento de la biomasa residual arbórea de las especies molle (*Schinus molle*) y álamo blanco (*Populus alba*).
- Ejercer la caracterización química y física del biocarbón obtenido de las especies arbóreas de estudio en el laboratorio, mediante el análisis elemental, poder calórico y termogravimétrico (TGA).
- Evaluar el biocarbón obtenido en pruebas de germinación de semillas para verificar su viabilidad.

1.2 Hipótesis

- Los resultados obtenidos en el análisis elemental, termogravimétrico (TGA) y poder calórico, con relación a la caracterización química y física de la biomasa de molle (*Schinus molle*) y álamo blanco (*Populus alba*) presentan viabilidad para la producción de biocarbón.
- Los resultados obtenidos de las variables químicas y físicas analizadas en el laboratorio, mediante el análisis elemental, termogravimétrico (TGA) y poder calórico de la biomasa y biocarbón difieren entre las especies arbóreas de molle (*Schinus molle*) y álamo blanco (*Populus alba*).

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biomasa

2.1.1 Definición.

Toscano (2009) define que la biomasa puede ser considerada como un recurso renovable que se encuentra derivada de diferentes componentes orgánicos, obtenidos como resultado de los procesos naturales o biológicos, artificiales y actividades antrópicas, por ello se puede considerar que el término biomasa hace referencia a cualquier tipo de materia orgánica que fue o que haya pertenecido a un ser vivo, sea de origen vegetal o animal, de igual forma señala que una gran parte de los residuos provenientes de la biomasa no se aprovechan y como resultado de esto afectan negativamente al medio ambiente por los gases contaminantes que se forman o producen en la descomposición de la misma.

Herguedas et al. (2012) indican que se denomina biomasa al fragmento de residuos que se descomponen por un procedimiento natural de los materiales residuales o desechos originados de las actividades del sector agrario, silvicultural e industrial. Desde el punto de vista conceptual de Castro (2018) expresa que la biomasa es una composición de elementos orgánicos estructurados en su mayoría por una armadura de átomos de hidrógeno, carbono, también de oxígeno y de pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno, de igual manera se constituye de polímeros naturales (celulosa, hemicelulosa y lignina).

EPEC (2014) menciona que la biomasa también es conocida como bioenergía y que dentro de este grupo se encuentran incluidos los desechos orgánicos municipales e industriales, también considera que la biomasa posee características para convertirse en energía renovable, debido a que el contenido energético que posee la biomasa vegetal proviene de la energía del sol y cumple con el proceso de fotosíntesis, de esta manera recirculando y manteniendo el nivel del contenido de carbono.

2.1.2 Aplicaciones.

Bermeo (2018) plantea que la biomasa es la mayor fuente de energía renovable en el mundo, dado a que la biomasa representa el 9.2 % de la demanda total de energía primaria y el 70 % de la oferta de energía renovable para la generación de elementos basados en carbón, al ser transformada la biomasa se puede convertir en un combustible, líquido, sólido o gaseoso.

En la actualidad, se han realizado investigaciones e indagado para que la biomasa se convierta en una fuente de energía amigable con el medio ambiente y como resultado se ha obtenido que la misma puede ser manipulada de dos formas, la primera es utilizarla de forma directa mediante la combustión de la biomasa y la segunda forma es indirectamente mediante la conversión por medio de transformaciones termoquímicas obteniendo combustibles sólidos, líquidos o gaseosos (Castro, 2018).

2.1.3 Clasificación.

En la investigación realizada por Toscano (2009) en su tesis de grado considera que la biomasa se puede clasificar en los siguientes tipos: natural, residual, cultivos energéticos y residuos agrícolas.

a. Natural.

La biomasa natural se produce en la naturaleza sin la intervención humana, este tipo de biomasa no es la más adecuada para su aprovechamiento ya que podría originar una rápida degradación de los ecosistemas naturales y presentar una inestabilidad económica en la cadena de usos tradicionales de la madera (Herguedas et al., 2012).

b. Residual.

La biomasa residual se divide en diferentes tipos como los desechos forestales, que provienen de los residuos que se obtienen como resultado de los procesos silvícolas y de cortes de pies maderables. Los residuos agrícolas comprenden todos los restos de poda, rastrojos de cultivos, etc. Por otro lado, los residuos de industrias forestales representan los aserraderos, papel, entre otros. Los residuos obtenidos de industrias agrícolas hacen referencia a los bagazos, orujos, vinazas, cáscaras, etc. y los residuos biodegradables conforman los purines, estiércol, lodos, etc (Toscano, 2009).

c. Cultivos energéticos.

Estos cultivos hacen referencia a las especies leñosas en turnos de 3 – 4 años y con 10 000 pies/ha, especies herbáceas (*Miscanthus*, *Cynara*, etc.), cultivos para producir etanol (Trigo, maíz, sorgo, etc.) y cultivos para producir biodiesel (girasol, lino, oleaginoso, etc.) (Toscano, 2009).

d. Excedentes agrícolas.

Sirven para suplir parcialmente los biocarburantes o combustibles fósiles (aceite de algodón, aceite de cártamo, etc.) y completar los cultivos no alimentarios (Toscano, 2009).

2.1.4 Ventajas del uso de la biomasa.

De acuerdo con Vignote (2016) la biomasa puede ser considerada como una fuente de energía amigable con el medio ambiente, debido a que su uso disminuye el impacto ambiental y combate contra el cambio climático, el manejo de la biomasa ayuda a mejorar el desarrollo de las regiones, entre las ventajas que tiene su uso se encuentran las siguientes:

- El contenido de dióxido de carbono que se emite es neutro
- Acorta la dependencia externa por el suministro de combustible
- Disminuye el riesgo de incendios e impactos forestales como plagas
- Reduce los riesgos ambientales como la depreciación de vertidos.

2.1.5 Necromasa.

Feldpausch et al. (2011) en su publicación sobre la “Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos”, indican que el término de necromasa hace referencia al conjunto de madera muerta que compone una gran fracción de la biomasa y de los nutrientes del ecosistema. Se considera que en los bosques de la Amazonía la necromasa constituye aproximadamente el 13 % de la biomasa aérea, por lo tanto, la necromasa en los bosques tropicales es un componente importante para el ciclo del carbono.

2.2 Biomasa lignocelulósica

2.2.1 Definición.

La biomasa lignocelulósica o también conocida como la biomasa de origen vegetal, obtenida básicamente por los residuos agrícolas, forestales e industriales, se puede considerar como un producto que no tiene un valor en específico, ni la apreciación de las condiciones en que se forma y se retiran estos desechos con el objetivo de facilitar y optimizar los procesos de producción (Palacios, 2016).

Abril & Navarro (2014) señalan que este tipo de biomasa es biodegradable, renovable y los principales componentes son la celulosa, lignina y hemicelulosa, de igual manera hacen referencia que los porcentajes o valores de estos componentes anteriormente señalados logran ser relativos, debido a que pueden variar considerablemente entre especies y de igual forma entre una misma especie, según Domínguez et al. (2009) esto se debe a que los componentes lignocelulósicos pueden tener variaciones por el tipo de suelo, el ciclo de la planta y las diversas condiciones climáticas. Major (2008) expresa que la biomasa es un

elemento básico en la preservación de la ponderación ecológica, también ayuda a mantener y acrecentar la pluralidad biológica.

Balboa (2005) revela que la biomasa con relación a un árbol se manifiesta como el total de la materia vegetal que posee, abarcando las partes de la biomasa área y subterránea, como las raíces, en cambio si se obtiene una plantación forestal la biomasa total será la suma de la materia vegetal de todos los individuos y esto se expone en forma de peso seco, masa o volumen.

2.2.2 Componentes.

Palacios (2016) sustenta que la biomasa lignocelulósica se compone de celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos (combinaciones de los componentes orgánicos y ciertos compuestos inorgánicos) que se transforman en cenizas después del proceso de combustión, esta biomasa conforma el cimiento de diferentes tipos de aplicaciones que pueden presentar un beneficio adicional, del mismo modo Barroso (2010) explica que el material lignocelulósico se encuentra compuesto por tejidos donde cada célula conforman una pared estructurada en una red de microfibrillas de celulosa, creando capas con envolturas de hemicelulosas y sobre las mismas se posa la lignina.

La celulosa es un holipolímero que posee un elevado peso molecular y representa un componente principal que conforma la pared celular, la densidad que posee este elemento varía dependiendo del tipo de árbol o planta, en cambio la hemicelulosa es el segundo polisacárido con mayor abundancia en la pared celular vegetal y contiene el 30 % al 35 % de peso seco de pared celular de los vegetales (Barroso, 2010; Palacios, 2016).

Según Arteaga et al. (2015) en la estructura química de la biomasa de maderas duras se puede obtener los siguientes valores, celulosa (40 % - 55 %), hemicelulosa (24 % - 40 %) y en lignina (18 % - 25 %). Por lo contrario, en la composición química de madera suave se alcanza un valor de (45 % - 50 %) en la celulosa, en la hemicelulosa se obtiene (25 % - 35 %) y en la lignina (25 % - 35 %).

2.2.3 Clasificación.

Castro (2018) nos da a conocer que la biomasa vegetal se clasifica en las siguientes clases:

a. Forestal o de bosque.

Este tipo de biomasa es la más explotada en el mundo con propósitos energéticos, principalmente para la obtención de leña.

b. Biomasa industrial.

La biomasa industrial se origina como la derivación de cualquier proceso en que se utilice biomasa y se produzca en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los restos de ascendencia orgánica generados por las industrias y casco urbano.

c. Biomasa residual agrícola y de residuos de poda.

Dentro del conjunto de biomasa excedente agrícola de origen herbáceo se encuentra la paja, cereales (arroz, trigo, cebada, etc.), caña, maíz y el girasol, también la biomasa excedente obtenida de la poda de los cultivos leñosos.

2.2.4 Beneficios y aplicaciones.

La biomasa es una fuente renovable de energía que contribuye a disminuir la aceleración del calentamiento global, otro de los beneficios que posee es la reducción de la tasa del dióxido de carbono en el ambiente y de los residuos que se obtienen durante los procesos de transformación de la materia prima, no obstante los combustibles biomásicos contienen niveles mínimos de sulfuro y no favorecen a las emanaciones que provocan la "lluvia ácida" (Toscano, 2009).

De igual manera, el uso de la biomasa en los procesos de combustión producen menos ceniza con relación al carbón mineral dependiendo de la metodología aplicada, también puede servir como insumo orgánico en los suelos, otra de las ventajas que presenta es la transformación de residuos forestales, agrícolas y urbanos para la generación de otros productos que favorezcan al medio ambiente, como el biocarbón, producto que disminuye significativamente los problemas que trae consigo las acciones inadecuadas en el manejo de los residuos (Toscano, 2009).

Guerra (2015) da a conocer que la biomasa puede ser transformada por medio de tres procedimientos importantes, en donde el primero hace referencia a los procesos de transformación bioquímica, por medio de la actividad microbiológica, el segundo proceso de producción es mediante la acción térmica, la misma que trata sobre la combustión bajo condiciones de exceso de aire, gasificación con cantidades limitadas de aire y pirólisis en ausencia de aire, por último se tiene el proceso de transformación físico-química que analiza la extracción y producción de aceites vegetales. Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones se utiliza el proceso de pirólisis y en menor grado la gasificación.

2.3 Zona urbana del cantón Cuenca

RIMAY (2004) en su publicación sobre "La flora del Barranco de Cuenca" manifiesta que las zonas verdes constituyen la biodiversidad de la ciudad de Cuenca, existe una

interacción ecológica entre la flora y fauna del lugar, es decir unas dependen de las otras para poder vivir, la calidad del ambiente es fundamental para que exista un ecosistema sano, en las áreas verdes de la ciudad se encuentran especies nativas, exóticas e introducidas.

2.3.1 Especies arbóreas de la zona urbana.

La Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) es responsable de la recolección de los residuos de pasto y poda que se forman en las áreas verdes y del material orgánico de grandes productores, también de los residuos orgánicos que se generan en los mercados dentro de la ciudad. Luego de la recolección de estos residuos se realiza un procedimiento técnico para obtener compost y humus, productos que sirven de abono orgánico en las superficies verdes de la ciudad y en el uso de personas o entidades particulares que requieran de este producto (EMAC EP, 2014).

Minga & Verdugo (2016) indican que en el centro urbano en los lugares destinados para aéreas verdes como parques, parterres y jardines particulares, la vegetación está predominada por arboles de las especies introducidas como: eucalipto (*Eucalyptus globulus*), urapán (*Fraxinus escelsior*), molle (*Schinus molle*), roble australiano (*Grevillea robusta*), sauce (*Salix humboldtiana*), álamo blanco (*Populus alba*), entre otros. De igual manera en la Tabla 1 se da a conocer a las especies que presentan abundancia dentro del arbolado urbano de la ciudad de Cuenca, como se puede observar las especies de álamo blanco (*Populus alba*) y molle (*Schinus molle*) se encuentran entre estas especies.

Tabla 1: Especies más abundantes en el arbolado urbano de la zona urbana del cantón Cuenca

Especies más comunes	Porcentajes
<i>Acacia melanoxylon</i>	2.38
<i>Agave americana</i>	2.36
<i>Baccharis trinervis</i>	3.38
<i>Callistemon citrinus</i>	4.36
<i>Callistemon sp</i>	3.44
<i>Eucalyptus glóbulus</i>	51.44
<i>Fraxinus chinensis</i>	2.90
<i>Hibiscus rosasinensis</i>	2.13
<i>Ligustrum japonicum</i>	2.94
<i>Populus alba</i>	2.32
<i>Salix babilonix</i>	3.24
<i>Sambucus nigrans</i>	3.15
<i>Schinus molle</i>	2.11
<i>Tecoma stands</i>	9.60
<i>Tecomaria</i>	4.41
Total	100

Fuente: Cordero et al. (2015)

2.3.2 Especie arbórea Molle (*Schinus molle*).

Este tipo de especie es conocida como “falso pimentero” o “pimienta del Perú”, es una especie arbórea siempre verde de 10 – 12 m de altura de ancha copa y ramaje colgante, de aspecto "llorón", ornamental, la forma del tronco es corto, grueso, muy fisurado, la corteza se desprende en placas y exuda resinas muy aromáticas, florece de abril a julio en la mayoría de los casos, así mismo el árbol tiene propiedades fructuosas, medicinales, plaguicidas y ornamentales, esta especie fue muy apreciada por las poblaciones del centro y Sudamérica que lo bautizaron como “árbol virtuoso”, también, su corteza y resina poseen propiedades tónicas, antiespasmódicas y cicatrizantes, el mayor uso que se da a este tipo de especie es para uso ornamental en áreas verdes (J. Sánchez, 2014).

Goleman et al. (2019) expone que este árbol se puede encontrar en varias provincias de los Andes hasta los 3000 ms.n.m. En la región se utiliza como especie arbórea ornamental en parterres de avenidas y parques de la ciudad. A continuación, en la Tabla 2 se presenta la taxonomía de la especie de *Schinus molle* (Figura 1).

Tabla 2: Taxonomía de la especie vegetal molle (*Schinus molle*)

Taxonomía	
Superdivisión	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Sub-clase	Rosidae
Orden	<i>Sapindales</i>
Familia	<i>Anacardiaceae</i>
Género	<i>Schinus</i>
Especie	<i>Schinus molle</i> L.

Fuente: Ayala (2011)



Figura 1: Especie vegetal molle (*Schinus molle*)

2.3.3 Especie arbórea Álamo blanco (*Populus alba*).

Es un árbol caducifolio que puede alcanzar unos 15 m de altura, con una amplia copa y tronco de color blanco-grisáceo que puede llegar a alcanzar 3 m de diámetro en la parte de la base del tronco y posee hojas de color blanquecino, durante el desarrollo el haz se torna en verde oscuro, el florecimiento se da entre los meses de febrero y abril, así mismo la defoliación se presenta de noviembre a enero, este árbol tiene un crecimiento rápido, pero es poco longevo (60 - 70 años), esta especie puede crecer en diferentes tipos de suelos, son inciertamente condescendientes a la salinidad y contaminación en general, también su hábitat natural lo componen las riberas de los ríos, sin embargo, se emplea a esta especie como árbol ornamental (Soriano, 2011). A continuación, en la Tabla 3 se presenta la taxonomía de la especie de estudio *Populus alba* (Figura 2).

Tabla 3: Taxonomía de la especie vegetal álamo blanco (*Populus alba*)

Taxonomía	
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	<i>Malpighiales</i>
Familia	<i>Salicaceae</i>
Género	<i>Populus</i>
Especie	<i>Populus alba</i> L.

Fuente: Ayala (2011)



Figura 2: Especie vegetal álamo blanco (*Populus alba*)

2.4 Biocarbón

2.4.1 Definición.

Parra (2016) da a conocer que el biocarbón o también conocido como biochar es un producto heterogéneo en su mayoría con un alto contenido de compuestos aromáticos y

material mineral, producido por pirólisis originada de forma sostenible bajo condiciones controladas y mediante el uso de tecnologías limpias o amigables con el medio ambiente, en efecto este producto puede ser definido como un material carbonoso que se obtiene como resultado de los procesos pirolíticos, en donde la biomasa experimenta distintas reacciones químicas en las que se rompen enlaces por fragmentación, despolimerización y volatilización.

Sun et al. (2017) refiere que el biocarbón es un producto con alto contenido de carbono dispuesto del proceso de pirólisis de la biomasa en ambientes de oxígeno limitado y temperaturas relativamente bajas. Análogamente, Lefèvre et al. (2017) argumenta que en la actualidad el biocarbón simboliza una de las prácticas progresistas e innovadoras y recomendadas para mejorar las propiedades del suelo y contribuir de manera positiva al medio ambiente disminuyendo los niveles de dióxido de carbono u otros gases contaminantes.

2.4.2 Características generales.

Escalante et al. (2016) refiere que el biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro cuyas características estructurales varían el tipo y tiempo de pirólisis, el biocarbón está constituido por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la materia prima, posee una alta porosidad con micro, meso y macroporos, por lo cual se ha comprado este producto con un arrecife subterráneo que puede ser habitado por microorganismos. Olmo (2016) manifiesta que la mayoría de los tipos de biocarbón son alcalinos ($\text{pH} > 7$), el nivel de porosidad del tipo de biochar es responsable de la elevada capacidad de retención de agua del biocarbón.

Para la estimación física del biocarbón se sugiere determinar las variables o parámetros de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo que corresponde al sólido que queda después de que la materia volátil ha sido expulsada, sin embargo para la caracterización química del biocarbón se miden los parámetros de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (Escalante et al., 2016).

2.4.3 Beneficios ambientales.

Los beneficios que posee el biocarbón son varios y por ello es factible aplicar el método de cascada, este sistema hace referencia a implementar su uso en algunas utilidades, antes de aplicar este material como tratamiento para el suelo. De acuerdo con Gilces Reyna (2014) explica que los beneficios del biocarbón aplicado al suelo se han atribuido a la disminución en la densidad aparente, reducción de lixiviación y escorrentía superficial, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y sirve de enmienda para los suelos. La

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación en una de sus publicaciones da a conocer que el biocarbón es una técnica innovadora para aportar e incrementar la calidad del suelo y así disminuir la contaminación por la emanación de dióxido de carbono (FAO, 2014).

Alcañiz (2013) da a conocer que el biocarbón tiene un efecto positivo en las propiedades físicas y químicas del suelo (por ejemplo, mejora en la conservación del agua, permeabilidad y adsorción de iones), contribuye con el tratamiento para disminuir la infertilidad de los suelos, por esta razón el rendimiento en el crecimiento de las plantas se incrementa, por otro lado, debido a la permanencia del contenido de carbono en el biocarbón la fabricación de este producto tiene como meta desarrollar nuevos proyectos tecnológicos con tácticas energéticas enfocadas en mitigar el cambio climático.

El biocarbón agiliza el crecimiento de las plantas y reduce las emisiones de metano, por ende en el sector agrícola la inversión en los abonos y fertilizantes se reduce en aproximadamente un 10 % que podría servir para invertir en la línea de producción y mejorar los procesos, también minoriza la pérdida de nutrientes, reduce la toxicidad del aluminio e incrementa la capacidad del intercambio catiónico (PLATICAR, 2018). Otro de los beneficios que posee el biocarbón es el efecto que produce en el desarrollo de las plantas beneficiando de manera positiva al crecimiento de la raíz, también contribuye de manera positiva a la respiración microbiana ayudando a la aireación del suelo (Olmo, 2016). A continuación, en la Figura 3 se dan a conocer algunos de los beneficios que posee el biocarbón.

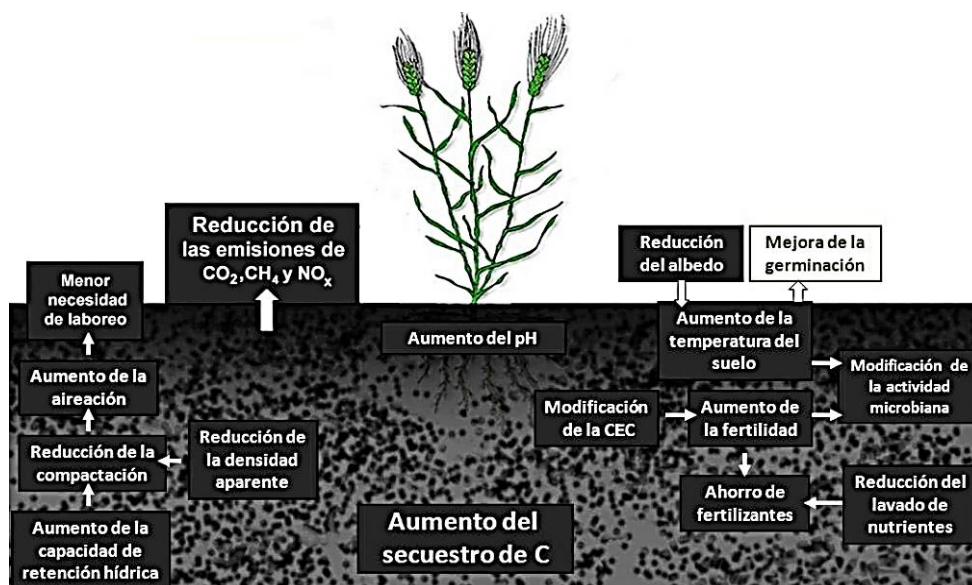


Figura 3: Beneficios del biocarbón en el suelo y plantas

Fuente: Olmo (2016)

2.4.4 Biocarbón en el Ecuador.

En este país se ha indagado la posibilidad de implementar nuevas alternativas para fomentar el desarrollo del sector agroindustrial, con relación al manejo sostenible y reducción de los residuos generados. Por ello se ha tratado la reintegración de tecnologías como la pirólisis y gasificación, que nos permitirá obtener nuevos e innovadores productos en base a la transformación y refinamiento de los residuos (Tangri & Wilson, 2017).

Heredia & Tarelho (2018) sostienen que el sector agroindustrial se ha convertido en el motor no petrolero del sector económico del país entre los años 2006 y 2015 alcanzado una participación en el PIB Nacional entre el 8 % y 9 %. Con el pasar de los años la producción del biocarbón ha tenido una relevancia, a pesar del uso como combustible, por otro lado, ayuda al incremento de la cantidad de materia orgánica en el suelo, de igual forma modifica el pH, con el propósito de influir en beneficio de los cultivos.

2.4.5 Producción de biocarbón.

La elaboración del biocarbón tiene su origen en la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica (pirólisis) aplicada en cualquier especie de biomasa que provenga de una fuente natural, para la producción del biocarbón se recalca el nivel de temperatura, tiempo de exposición del material, métodos de conversión de la bioma (termoquímica, mecánica o biológica) y el tipo de materia prima (Abenza, 2012).

Mateos (2018) postula que se puede realizar biocarbón con cualquier tipo de material de origen orgánico, como los residuos provenientes del sector ganadero, agrícola, plantas de tratamiento, residuos de las zonas urbanas y del sector forestal. En cambio, Arauzo et al. (2014) destaca que entre las técnicas más utilizadas para la conversión de la biomasa se obtiene el método de termoquímica donde se encuentra la combustión o carbonización, pirólisis (lenta, rápida, ultrarrápida), gasificación, licuefacción y torrefacción.

2.5 Método de torrefacción

2.5.1 Definición.

Bermeo (2018) en su investigación manifiesta que el método de torrefacción es un pretratamiento termoquímico conocido como pirólisis realizado a temperaturas entre los 200 °C y 300 °C, se desarrolla en una atmosfera inerte o con vapor, este método se puede implementar en diferentes materiales orgánicos, también señala que el proceso de torrefacción pasa por las fases de desvolatilización, deshidratación, despolimerización y carbonización.

Chew & Doshi (2011) plantean que mediante todas estas fases los componentes de la biomasa se destruyen mientras la temperatura se incrementa, la hemicelulosa se descompone en bajas temperaturas, luego la celulosa a temperaturas altas y el último elemento en descomponerse es la lignina.

Por su parte, Domínguez (2015) define que la torrefacción es la etapa que se desarrolla entre los 100 °C y 300 °C de temperatura, en ella se produce la degradación casi completa del contenido de hemicelulosa de la materia prima, maximizando la densidad energética y el rendimiento másico del producto sólido generado. También, este proceso se distingue por las emisiones de bajo peso molecular como el monóxido y dióxido de carbono.

La torrefacción, también llamada pirólisis moderada o tostado, es el proceso de descomposición térmica que sufre la biomasa a temperaturas de 200 °C a 320 °C a presión atmosférica y en ausencia de agentes oxidantes. Durante este proceso se elimina el agua y productos orgánicos volátiles a la vez que se acortan largas cadenas de polisacáridos (Pérez, 2016).

2.5.2 Características generales.

Bermeo (2018) reporta que el aumento de la temperatura en la biomasa se torna en otro color y las características se asemejan a las de biocarbón, la pérdida de masa y el consumo de calor son más intensos en las primeras etapas. A continuación, en la Figura 4 se puede observar las etapas de transformación de la biomasa a biocarbón por el método de torrefacción.

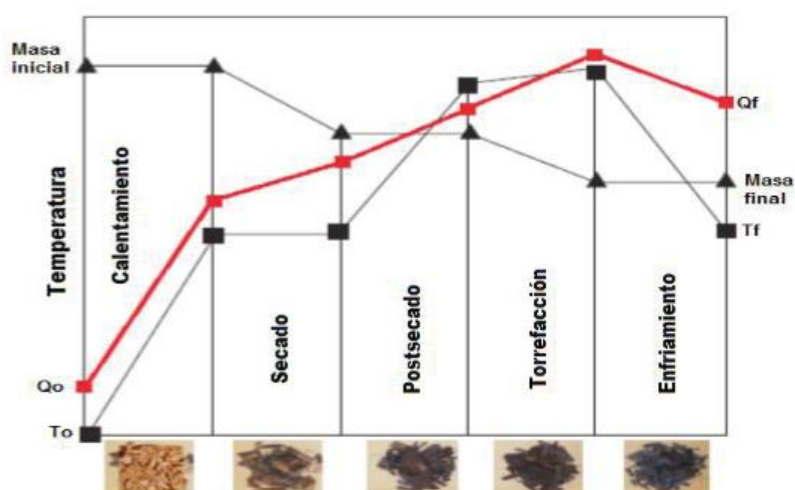


Figura 4: Transformación de la biomasa en el proceso de torrefacción

Fuente: Bermeo (2018)

El proceso empieza con temperatura ambiente hasta los 100 °C, en esta etapa si se vuelve a humedecer las muestras, estas podrían volver a su forma original. La siguiente

etapa es el secado, donde se disminuye completamente la humedad y la temperatura se mantiene constante, el proceso de post-secado se da entre la temperatura de 150 °C y 200 °C aquí se destruyen los enlaces de hidrógeno y carbono dando como resultado extractos lipofílicos y la muestra se deforma, en esta parte del proceso la biomasa no puede recuperar su forma original si se vuelve a humedecer (Arteaga et al., 2015).

En el proceso de torrefacción al pasar los 280 °C la reacción se convierte totalmente en exotérmica y la emanación de gases aumenta por el proceso de carbonización y desvolatilización, en esta fase se desarrollan la mayoría de interacciones intramoleculares de los enlaces de hidrógeno, también se forman extractos hidrófilos, alcoholes, éteres y gases como monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano, la biomasa se destruye y pierde su estructura convirtiéndose en frágil (Bermeo, 2018).

A una temperatura mayor a los 300 °C se da el proceso de desvolatilización y carbonización de los polímeros, cambia el color y al enfriarse no cambia su estructura, durante el proceso de transformación de la biomasa se crean reacciones como la generación de agua, compuestos orgánicos volátiles como: el acético, metanol e incondensables como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, entre otros, también indica que las muestras deben de enfriarse antes de retirar del reactor debido a que si entra en contacto con oxígeno estas se podría combustionar (Arteaga, Segura, et al., 2015).

2.5.3 Factores que influyen en la torrefacción.

Bermeo (2018) postula que existen tres componentes principales que influyen en el proceso de torrefacción, el primero trata sobre las características físicas y químicas que posee la biomasa o materia prima, la temperatura y el tiempo de exposición. No obstante, Ferro & Soler (2009) manifiestan que el tipo de biomasa está relacionado con la composición lignocelulósica que posee la madera, por ende, se puede obtener una mayor cantidad de fracción sólida que líquida o gaseosa.

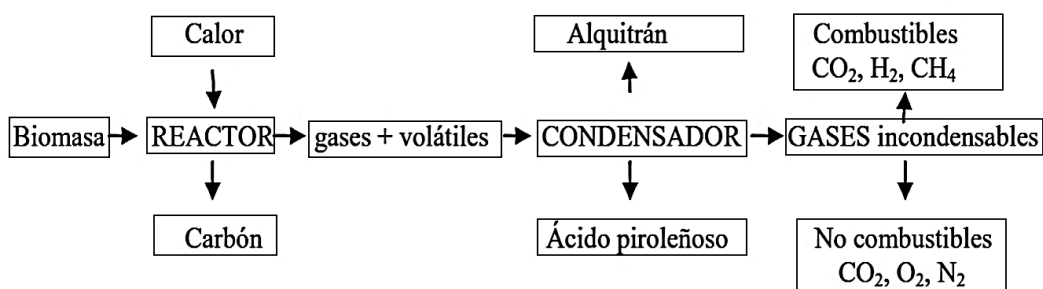
Arteaga et al. (2015) aluden que la temperatura es otro de los factores que influye en el proceso de torrefacción, debido a que este factor establece el nivel de degradación térmica que tendrá la biomasa después del proceso, mediante la desintegración de cada polímero que componen la estructura celular de la biomasa, y por último el factor de tiempo, es importante en el proceso de torrefacción debido a que el tiempo de residencia determina las características físicas que el biocarbón va a poseer después del proceso.

Cabe resaltar que si el tiempo de torrefacción aumenta disminuye el rendimiento másico, sin embargo, aunque el tiempo de exposición o residencia sea menor igualmente afecta a

la estructura de la biomasa (Bermeo, 2018). De acuerdo con Segura et al. (2016), mientras mayor sea el tiempo de residencia, menor será el rendimiento de la masa y energía.

2.6 Pirólisis

La pirólisis puede definirse como un proceso termoquímico en donde un material orgánico es transformado por la acción del calor en una fracción líquida (bioaceites), sólida (biochar) y gaseosa, en una atmósfera sin presencia de oxígeno con relación al proceso de torrefacción (200 °C – 300 °C) (Parmar et al., 2014). Sin embargo, Cueto (2016) expresa que el término de pirólisis hace referencia a la desintegración de la biomasa a temperaturas



elevadas entre los 300 °C y 900 °C. A continuación, se da a conocer un esquema (Figura 5) donde se exponen algunos de los gases que se obtienen durante el proceso de combustión de la biomasa.

Fuente: Wolfgang et al. (2008)

Los factores que influyen en el proceso de pirólisis son: la composición de la biomasa, la temperatura, la operación y el tipo de pirólisis donde se libera energía que al final como resultado se adquiere un material sólido (Marín et al., 2018). La descomposición térmica

Figura 5: Descomposición de la biomasa por efectos del calor de combustión

de la biomasa se relaciona con la desintegración de los componentes primordiales que la conforman, como la celulosa, hemicelulosa y lignina, el contenido de estos tres componentes puede presentar procesos diferentes durante la pirólisis y por ende variar dependiendo del tipo de biomasa (Mohan et al., 2006).

De acuerdo con Trujillo (2017) el método de pirólisis convierte a la materia de origen orgánico en una táctica competitiva, con relación a los combustibles que generan afecciones e impactos en el medio ambiente, debido al nivel de efectividad que muestran como tratamiento, también señala que en el proceso de pirólisis se puede alcanzar un rendimiento mayor del producto final si se aplica temperaturas entre los 300 °C y 650 °C.

Según, Brick et al. (2010) existen cuatro tipos de pirólisis para el proceso de transformación de la biomasa, mediante el proceso de pirólisis lenta, rápida, ultra-rápida y gasificación, los diferentes tipos de pirólisis ayudan a la creación de nuevos productos, a continuación en la Tabla 4 se exponen algunos de los procesos de conversión térmica de la madera.

Tabla 4: Rendimientos aproximados de los productos (base madera seca) obtenidos en diferentes formas de pirólisis

Forma	Condición	Líquido	Carbón	Gas
Gasificación	~800°C	5	20	85
Rápida	~500°C corto tiempo de residencia de vapor caliente ~1s	75	12	13
Intermedio	~500°C corto tiempo de residencia de vapor caliente ~10-30s	50	25	25
Carbonización lenta	~400°C largo tiempo de residencia del vapor ~horas-días	30	35	35
Torrefacción lenta	~290°C, tiempo de residencia de sólidos ~30min	-----	82	18

Fuente: Klug (2012)

2.6.1 Pirólisis lenta.

Este tipo de pirólisis se basa en el calentamiento uniforme, parcial y lento a temperaturas entre los 300 °C y 450 °C, obteniendo aproximadamente el 40 % de la biomasa inicial (Unda et al., 2018). De igual manera, Herrera (2018) manifiesta que es el proceso donde la biomasa presenta un incremento del calor de manera paulatina y homogénea entre temperaturas de 450 °C y 650 °C.

Por otro lado, Czernik & Bridgwater (2004) dan a conocer que este tipo de procedimiento se lleva a cabo con temperaturas menores a 600 °C y espacios de exposición de 5 - 30 minutos, el proceso de pirólisis lenta se encuentra conformado por tres fases, la primera es el secado, donde la temperatura es menor a 100 °C, la segunda fase se da entre los 100 °C y 300 °C, la última fase es la pirólisis donde se da la desintegración de la estructura de la biomasa y se obtiene el producto.

2.6.2 Pirólisis rápida.

Pinedo (2013) expone que este tipo de pirólisis es el proceso donde el material de análisis se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno y a temperaturas elevadas, según Rebolledo et al. (2019) el calentamiento que se presenta en el proceso es alto ($200\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$) y en la mayoría de casos la temperatura es mayor a 550 °C.

2.7 Análisis para la caracterización

2.7.1 Análisis elemental o último.

Rojas et al. (2016) postula que este análisis es una técnica que permite determinar la composición elemental de la biomasa, presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas. Según el Instituto Nacional de Preinversión (2014) la caracterización química de la biomasa involucra obtener el porcentaje en peso de oxígeno, carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno, mediante el análisis elemental. Igualmente, Pérez (2016) indica que el análisis elemental proporciona el contenido de los parámetros señalados anteriormente.

a. Elementos del análisis elemental.

El análisis elemental permite medir el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de muestras que provienen de origen orgánico e inorgánico y sintético, mediante la combustión de oxígeno puro, obteniendo elementos como dióxido de carbono, vapor de agua, óxidos de nitrógeno y azufre dependiendo del elemento analizado (Laboratorio de Técnicas Espectroscópicas - LABTE, 2013).

2.7.2 Análisis Termogravimétrico (TGA) o proximal.

La técnica de Análisis Termogravimétrico mide la cantidad y velocidad del cambio en peso de una muestra en función de la temperatura o del tiempo en una atmósfera controlada. Esta técnica es utilizada para caracterizar materiales que presentan pérdida de peso debido a la descomposición, oxidación o deshidratación del material (Manals et al., 2011). Según el Instituto Nacional de Preinversión (2014) la caracterización física de la biomasa involucra obtener el análisis termogravimétrico o próximo para evaluar el contenido de carbono fijo, material volátil, cenizas y humedad.

b. Humedad.

Toscano (2009) declara que el contenido de humedad de la biomasa es la cantidad de agua que posee el material.

c. Contenido volátil.

Según Bermeo (2018) el contenido volátil es la mezcla de carbono, hidrógeno y otros compuestos gaseosos determinados por la desintegración de la biomasa y rompimiento de enlaces químicos. Igualmente, Delvasto (2017) señala que los componentes volátiles de los diferentes tipos de biocarbón, hacen referencia aquellas sustancias presentes en el material que se gasifican cuando se incrementa la temperatura del material en ausencia de oxígeno.

d. Contenido de cenizas.

De acuerdo con Al-Kassir (2013) el contenido de cenizas es el residuo en estado sólido, que se obtiene después del proceso de combustión completa de un componente. Neri-Segura (2002) refiere que la ceniza de la biomasa posee fósforo y potasio, este sólido se puede reciclar aplicando al suelo para enriquecerlo y reponer los terrenos de cultivos alterados.

e. Carbono fijo.

Desde el punto de vista de Urien (2013) el contenido de carbono fijo es la masa que se obtiene posterior a la liberación de las sustancias volátiles, cenizas y humedad.

2.7.3 Análisis de poder calórico.

El autor Al-Kassir (2013) deduce que la cantidad de calor redimido durante la combustión completa de un proceso es llamado poder calórico, es decir la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa es quemada totalmente. También plantea que el contenido de poder calórico por unidad de masa es la medida que determina la energía aprovechable en la biomasa y se enuncia como el contenido de energía por unidad física.

Castro (2018) argumenta que el poder calórico es el conjunto de energía máxima conformada de calor, donde se libera por unidad de masa de un elemento al ser este sometido a una reacción química de oxidación.

El poder calórico es la cantidad de calor que se libera cuando se quema la unidad de masa de un combustible en condiciones normalizadas (Pérez, 2016). Es la energía que se libera en forma de calor, cuando la biomasa se quema completamente (Herguedas et al., 2012).

a. Poder calórico inferior (PCI).

Castro (2018) postula que el PCI es el calor generado por la combustión que utiliza la energía producida por la condensación del agua, esto está directamente determinado por la bomba del calorímetro. Pérez (2016) menciona que los gases producidos durante la combustión se encuentran a temperaturas relativamente bajas y el ensayo se lleva a cabo a alta presión, la mayor parte del agua condensa, por lo que se determina el poder calórico bruto a volumen constante, es decir el poder calórico superior incluye el calor de condensación del vapor formado a partir de la humedad de la muestra y del producto por combustión del hidrógeno.

b. Poder calórico superior (PCS).

De igual manera, Castro (2018) denomina que el poder calórico superior o neto producido por la combustión no utiliza la energía generada por la condensación del agua, y puede calcularse con el conocimiento de la humedad y el contenido de hidrógeno de la muestra analizada.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Zona de estudio

Para la caracterización de la biomasa residual de las podas de árboles y producción de biocarbón, se escogieron entre las especies arbóreas que poseen mayor abundancia, resiliencia y que presentan un crecimiento rápido en el arbolado de las áreas verdes de la zona urbana del cantón Cuenca (Figura 6), provincia del Azuay.

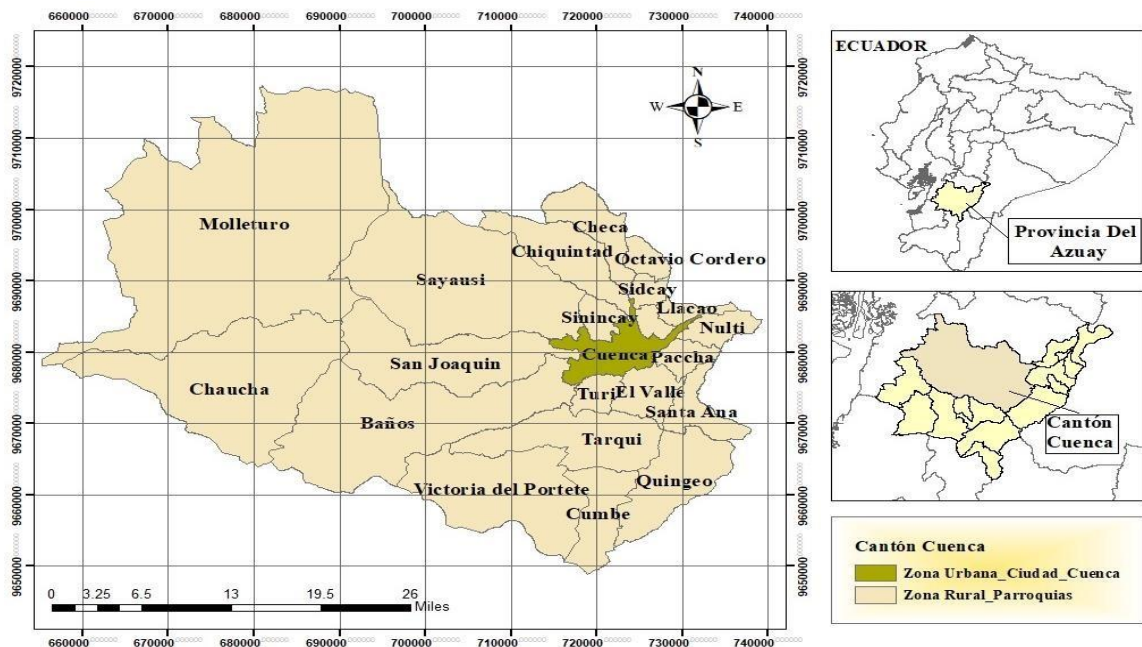


Figura 6: Mapa de ubicación del cantón Cuenca

Fuente: QGIS (2019)

Los análisis (elemental, termogravimétrico y poder calórico) para la caracterización química y física de la biomasa, también la producción del biocarbón por el método de torrefacción y la caracterización del mismo, se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina, en Lima – Perú, en base al protocolo descrito en el Anexo 1. En el cantón Cuenca se evaluó la germinación y crecimiento de las plántulas de girasol con dos tipos de concentración de biochar, mediante diluciones de 1:5 y 1:10.

3.2 Población y muestra de estudio

3.2.1 Población.

La ciudad de Cuenca cuenta aproximadamente con 365 hectáreas de áreas verdes, en donde engloban parques, parterres, parques lineales, redondeles, plazas, entre otros,

también sirven para descanso, deporte y distracción de la población. Actualmente, en el cantón Cuenca existen 505 585 personas, de acuerdo con el censo poblacional del año 2010 y 9.06 m² de área verde por habitante (INEC, 2010). En la Figura 7 se observa el mapa de las áreas verdes de la zona urbana del cantón de Cuenca.

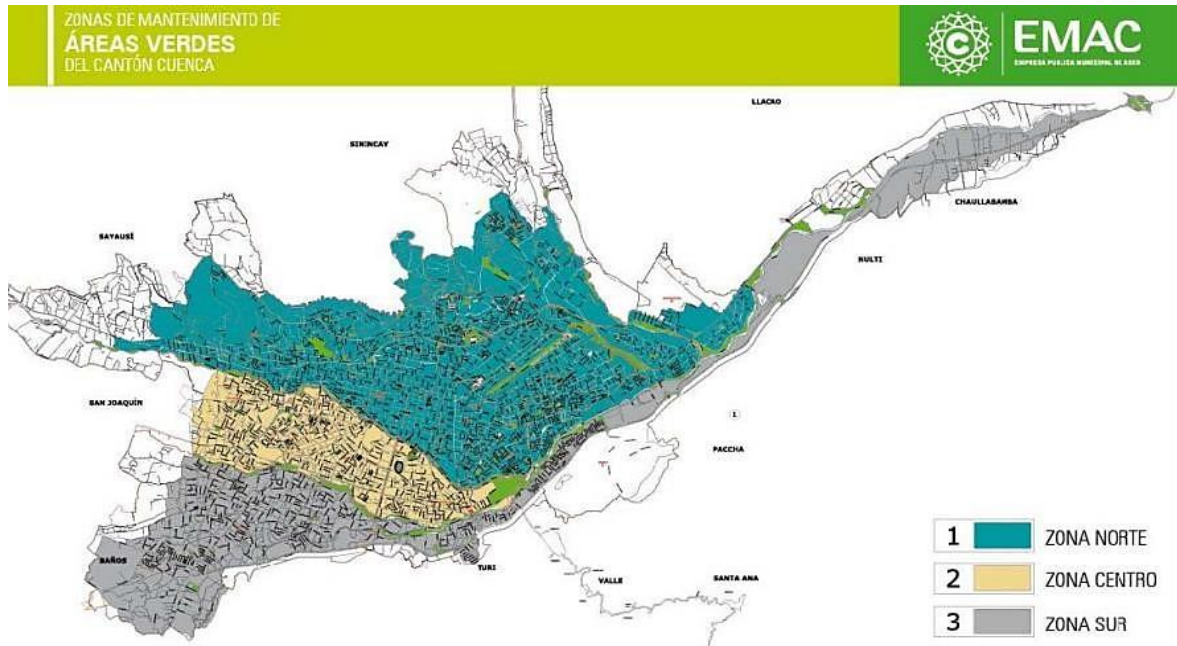


Figura 7: Mapa de las áreas verdes de la ciudad de Cuenca
Fuente: Baculima (2011) obtenida de EMAC EP

Los sitios seleccionados para obtener las muestras de biomasa residual de podas fueron tres de los parques más representativos (Figura 8) y con mayor extensión de la zona urbana de la ciudad (Tabla 5).

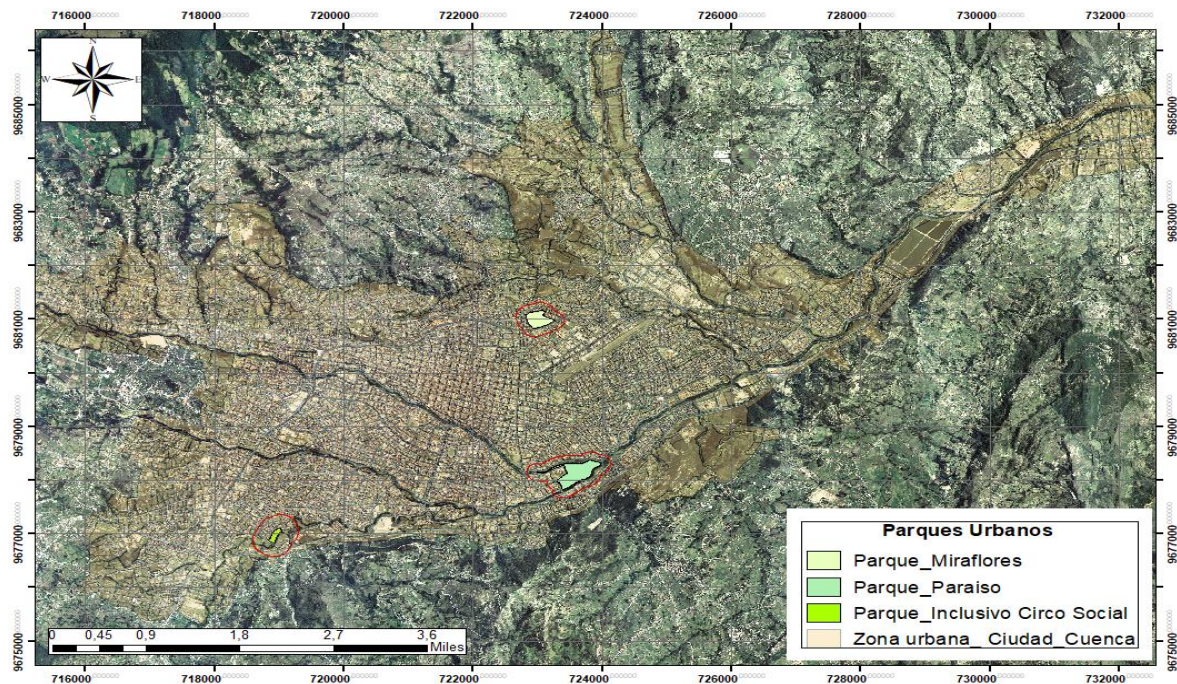


Figura 8: Ubicación de los parques donde se recolectó la biomasa residual de estudio
Fuente: QGIS (2020)

a. Parque del Paraíso

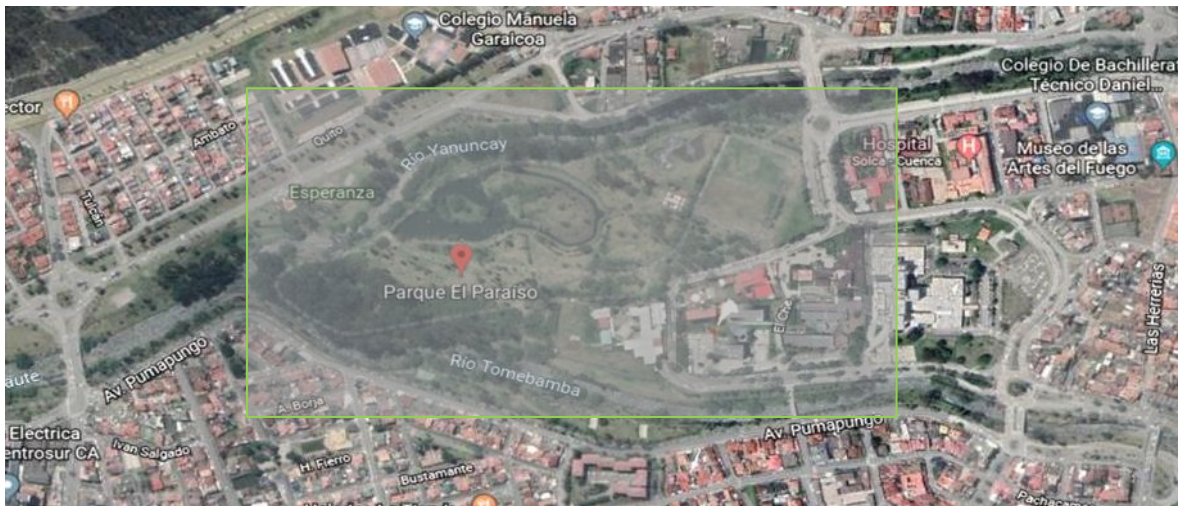


Figura 11: Parque el Paraíso

Fuente: Google Earth (2019)

3.2.2 Muestras de estudio

Las muestras de biomasa residual para el análisis de caracterización y producción de biocarbón fueron obtenidas de las podas de los árboles de molle (*Schinus molle*) y álamo blanco (*Populus alba*) pertenecientes a los parques anteriormente señalados, el aprovechamiento de estos residuos lignocelulósicos presentó la posibilidad de aplicar la conversión de la materia prima para obtener biocarbón, mediante la transformación termoquímica de la biomasa. En la Figura 12 se visualizan las muestras de biomasa recolectadas en fundas ziploc para ser transportadas al laboratorio.



Figura 12: Muestras recolectadas de la biomasa de álamo blanco (a) y molle (b)

Para la recolección de las muestras se aplicó la técnica de cuarteo, esta técnica es utilizada por el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina (Anexo 1) para analizar los residuos sólidos orgánicos que se encuentran en una pila o montón, la cual consistió en dividir por secciones y en cada sección se volvió a

realizar un cuarteo tomando muestras de la parte externa e interna de la pila, se recolectó 3 kg por cada especie.

3.3 Materiales y equipos

3.3.1 Materiales para la recolección de la biomasa.

En la Tabla 6 se expone las herramientas que se utilizó para la obtención de las muestras de biomasa residual de las especies de estudio, en los parques anteriormente señalados.

Tabla 6: Materiales para la obtención de las muestras de biomasa residual

Materiales	Cantidad
Tijeras de poda	1 unidad
Sierra de mano	1 unidad
Fundas Ziploc	4 unidades
Guantes de protección	1 unidad
Muestra de biomasa (podas)	3 kg cada especie
Balanza	1 unidad

3.3.2 Materiales para el acondicionamiento de las muestras.

Para la preparación y acondicionamiento de las muestras, se utilizaron los materiales descritos en la Tabla 7.

Tabla 7: Materiales para la preparación y acondicionamiento de las muestras de álamo blanco y molle

Materiales	Equipos
Vasos de precipitación	Balanza analítica
Escofina	Horno
Muestras de biomasa	
Triturador	

3.3.3 Materiales y equipos para la caracterización de la biomasa y biocarbón.

En la Tabla 8 se expone los materiales y equipos utilizados en la caracterización de la biomasa y biocarbón obtenido de las especies arbóreas de molle y álamo blanco, mediante los análisis elemental o último, termogravimétrico y poder calórico.

Tabla 8: Materiales y equipos para los análisis de caracterización de la biomasa y biocarbón

Tipo de análisis	Materiales	Equipos
Carbono	Cápsulas de aluminio	Analizador Elemental
Hidrógeno	(Tin Foil Cups)	Balanza analítica (g)
Nitrógeno	Espátula Muestras limadas de biomasa Alcohol	
Oxígeno	Pinza metálica Muestras limadas de biomasa Cápsulas de estaño Espátula pequeña	Módulo de oxígeno Balanza analítica (mg)
Azufre	Barco de combustión Muestras limadas de biomasa Cuchara espátula	Módulo de Azufre Balanza analítica (g)
Humedad	Crisoles de cerámica	Analizador
Material volátil	Cuchara espátula	Termogravimétrico
Cenizas	Muestras limadas de biomasa	
Carbono fijo		
Poder calórico Superior	Crisoles de combustión Hilo de algodón (tensión) Pinzas	Analizador de Poder calórico Máquina de llenado de O_2
Poder calórico Inferior	Muestras limadas de biomasa Cuchara espátula	

3.3.4 Materiales y equipos para la producción de biocarbón.

Para la producción de biocarbón se utilizaron las herramientas, que se exponen en la Tabla 9.

Tabla 9: Materiales y equipos utilizados para la producción del biocarbón

Materiales	Equipos
Muestras de biomasa	Módulo
Crisoles de cerámica	termogravimétrico
Cuchara espátula	
Escofina	
Triturador	

3.3.5 Materiales y equipos para las pruebas de crecimiento con plántulas

Para llevar a cabo las pruebas o ensayos con las diluciones se utilizaron los materiales escritos en la Tabla 10.

Tabla 10: Materiales y equipos para realizar los ensayos de germinación y crecimiento

Materiales	Equipos
Bandejas de aluminio	Balanza analítica
Semillas de girasol	
Biocarbón de álamo blanco	
Biocarbón de molle	
Agua desionizada	
Probeta 100 mL	
Vaso de precipitación	
Varilla de vidrio	

3.4 Metodología

3.4.1 Desarrollo metodológico.

La caracterización química y física de la materia prima, que se obtuvo a partir de la biomasa residual de las especies *Schinus molle* (M1) y *Populus alba* (M2) se realizó mediante el análisis elemental, termogravimétrico y poder calórico, posteriormente se llevó a cabo una comparación con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio para determinar la aptitud y viabilidad de la biomasa con relación a la producción de biocarbón.

Mediante la indagación de literatura se determinó que no hay investigaciones referentes al tipo de biomasa (molle y álamo blanco), no obstante se obtuvo algunos estudios enfocados en los procesos y metodología que a continuación se mencionan sobre la caracterización de la biomasa y producción de biocarbón, por lo cual se optó en buscar información de recursos similares de otras especies de biomasa lignocelulósica arbórea para comparar con los resultados obtenidos en la caracterización física y química de la biomasa y biocarbón de las especies de estudio.

Para la caracterización química de la biomasa residual se utilizó el análisis elemental y poder calórico en base a la metodología de Pérez (2016). Según Herguedas et al. (2012) expone que la composición química de la biomasa se puede obtener mediante este análisis, el cual permite conocer el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O). De igual manera, Al-Kassir (2013) señala que estos elementos son los más abundantes y por lo tanto pertinentes para analizar en una primera fase, debido a que el análisis elemental de una muestra de biomasa tiene como idea primordial determinar los principales elementos químicos (orgánicos) que conforman la misma.

Lo expuesto anteriormente se confirma con la investigación realizada por Sun et al. (2017), donde indica que los componentes más sustanciales de la biomasa son el C, H, O, N y S, de igual manera el Instituto Nacional de Pre-inversión (2014) refiere que el análisis elemental de la biomasa implica obtener el porcentaje en peso de los parámetros

anteriormente señalados. A continuación, en la Figura 13, se describe el procedimiento que se utilizó para la caracterización química de la biomasa residual.

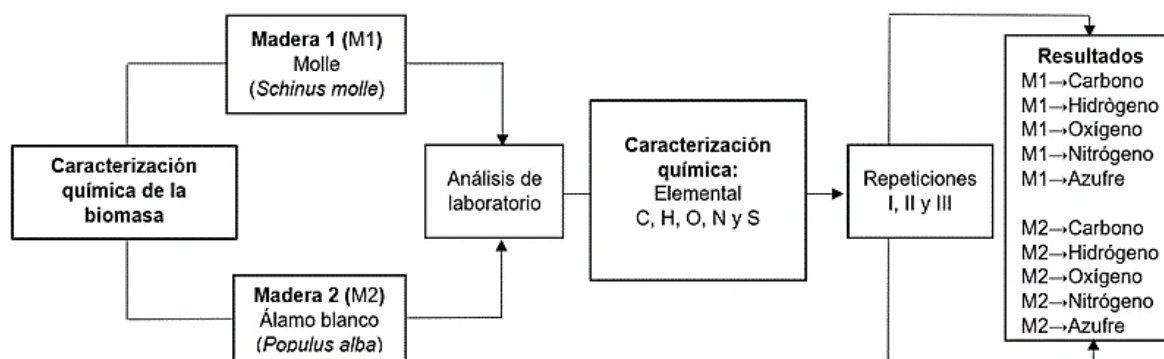


Figura 14: Procedimiento para la caracterización química de la biomasa residual

Castro (2018) manifiesta que el análisis termogravimétrico o próximo sirve para evaluar el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo presentes en las muestras de estudio, por su parte Bermeo (2018) expresa que estos parámetros forman parte de la caracterización física, en la Figura 14 se muestra el procedimiento que se siguió para realizar la caracterización física de la biomasa residual.

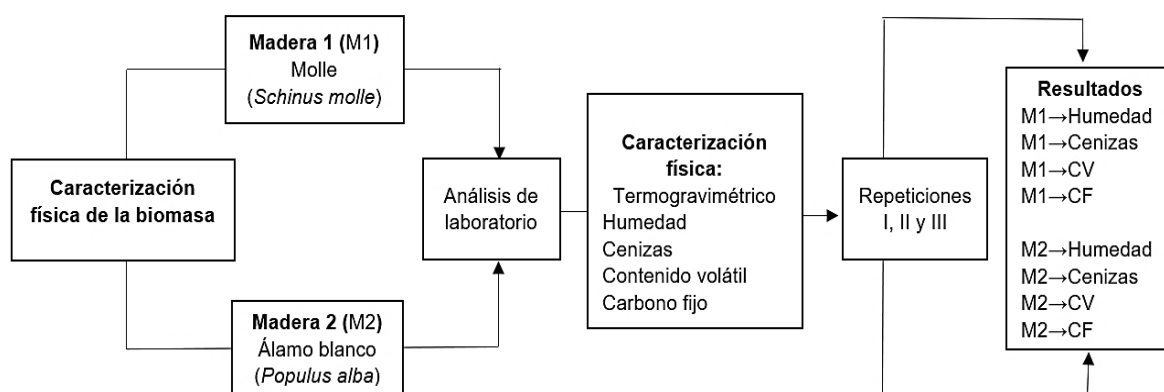


Figura 13: Procedimiento para la caracterización física de la biomasa residual

Después de la caracterización de la biomasa residual se realizó una evaluación de los resultados obtenidos y mediante la relación Carbono - Nitrógeno (C / N) se determinó la viabilidad de la biomasa para la producción de biocarbón en base a la investigación de Martínez (2015) y Guerra (2015). De acuerdo con, los investigadores Atuesta & Sierra (2015), la biomasa debe tener un porcentaje (< 10%) en el contenido de humedad para la producción de biocarbón.

En la elaboración del biocarbón se aplicó la metodología empleada por Bermeo (2018) que utilizó el método de torrefacción a 300 °C y efectuó la caracterización física del mismo mediante el análisis termogravimétrico, obteniendo así los valores de los parámetros de

humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo. La metodología que se utilizó para la caracterización química del biocarbón a partir de biomasa arbórea, se basó en la investigación realizada por Pérez (2016) que realizó la caracterización de este producto mediante el análisis elemental.

Castro (2018) argumenta que, por lo general el biocarbón está constituido principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, elementos que forman parte de la composición química del mismo. Se precisó realizar la caracterización física y química del producto obtenido, debido a que es importante evaluar las propiedades o características que posee el medio donde se van a germinar las semillas y posteriormente a desarrollar las plántulas de girasol. En la Figura 15 se muestra el procedimiento que se aplicó para la caracterización del biocarbón.

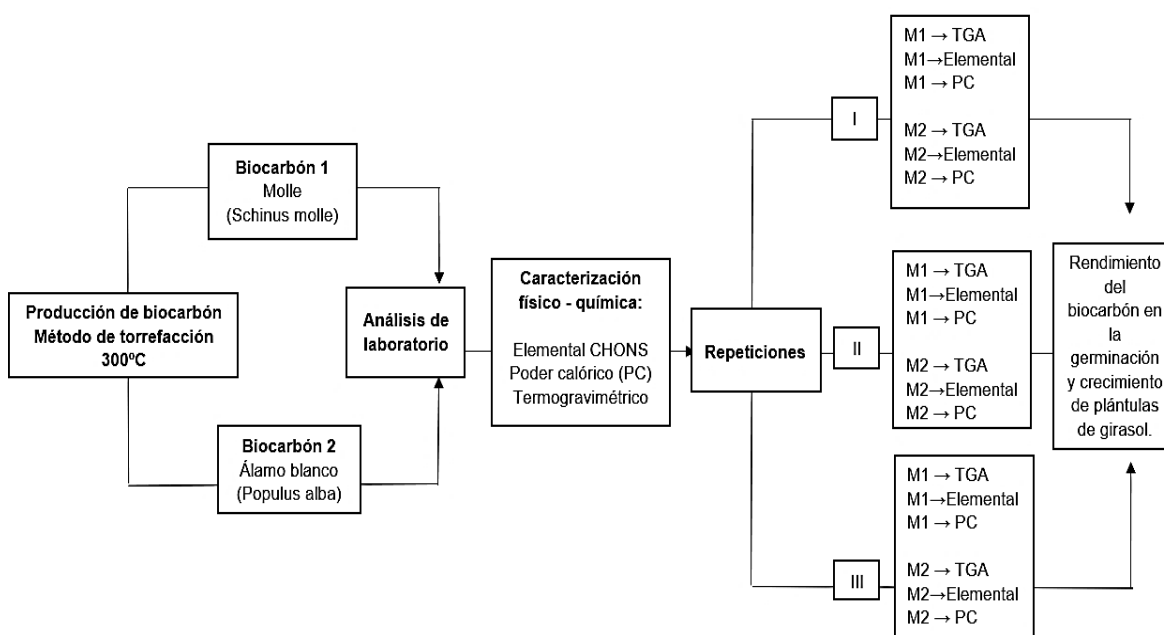


Figura 15: Procedimiento para la producción y caracterización del biocarbón

Los métodos que se utilizaron para la medición de los parámetros físicos y químicos en la caracterización de la biomasa y biocarbón se exponen en la Tabla 11, de esta forma dando a conocer, el método de referencia que posee cada equipo para cumplir con su función, estos equipos trabajan en base a la norma de estandarización ASTM (American Society for Testing and Materials), de acuerdo con Bermeo (2018) estas normas son aplicadas para viruta de árbol, aserrín, pellets u otro tipo de elemento particulado de madera. Los análisis aplicados en la caracterización de la biomasa y biocarbón fueron efectuados en base a los mismos procedimientos, debido a que los equipos y materiales del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina sirven para medir varias muestras de origen orgánico, sintético e inorgánico.

Tabla 11: Normas aplicadas para la caracterización de la biomasa y biocarbón

Estudios	Parámetro	Materiales
Elemental CHONS o último	Carbono	ASTM D5373
	Hidrógeno	Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke.
	Nitrógeno	
	Oxígeno	
Azufre	ASTM D4239 Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using high-temperature Tubefurnace Combustion.	
Termogra- vimétrico (TGA)	Humedad	ASTM D7582
	Material	Standard test methods for carbon proximity analysis using macro thermogravimetric analysis.
	Volátil	
Poder calórico	Carbono fijo	ASTM D 5865
	PCI	Standard Test Method for the Gross Calorific Value of Coal and Coke
	PCS	

Fuente: Laboratory Equipos Corporation (2018)

Con el fin de evaluar la aptitud de los tratamientos de biocarbón de álamo blanco y molle se realizó pruebas de germinación con semillas de girasol (*Helianthus annuus*), para lo cual se consideró realizar ensayos con referencia al estudio de Gilces (2014) que estableció diluciones de peso / volumen (w / v) en la siguiente relación: dilución en extracto acuoso de 1:10 que representa la concentración baja de biocarbón y 1:5 hace referencia a la concentración alta de biocarbón, posteriormente se realizó el registro semanal del crecimiento de las plántulas de girasol. A continuación, se presenta una descripción detallada sobre los procedimientos y métodos utilizados durante el desarrollo de la investigación.

3.4.2 Acondicionamiento de la materia prima.

El acondicionamiento de las muestras de materia prima se efectuó en base al protocolo del laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina (Anexo 1), el cual establece que las muestras de análisis deben tener una pulgada de longitud alcanzando uniformidad de las mismas como se muestran en la Figura 16, para obtener una mejor manipulación de las muestras.

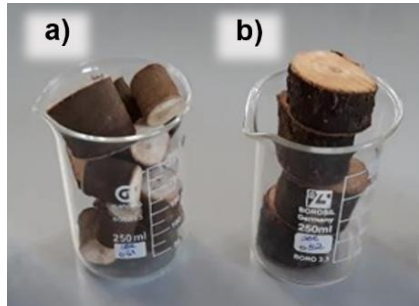


Figura 16: Muestras de biomasa de las especies de álamo blanco (a) y molle (b)

3.4.3 Preparación de la materia prima para los análisis de laboratorio.

Las muestras de biomasa residual de las especies de estudio fueron secadas en una estufa a 105 °C hasta lograr un porcentaje menor de humedad y un peso constante. Luego de que las muestras pasaran por el proceso de secado con ayuda de una escofina se procedió a limar, con el fin de estandarizar el tamaño de la materia prima obteniendo 35 g por cada especie para los análisis de caracterización físico y químico de la biomasa.

En el laboratorio las muestras se etiquetaron con la siguiente codificación 052 (álamo blanco) y 053 (molle) como se puede observar en la Figura 17, para la preparación de las muestras de análisis se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM E1757- 01(07) Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis.

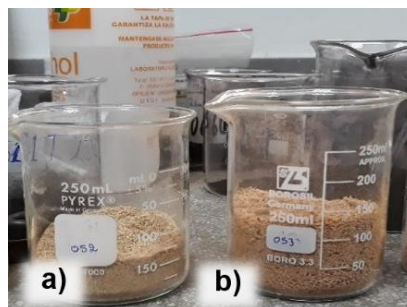


Figura 17: Limaduras de la biomasa residual de las especies de álamo blanco (a) y molle (b)

Por lo contrario, para la preparación de las muestras de biocarbón que fueron utilizadas para los análisis de laboratorio el procedimiento fue distinto, es decir, se procedió a moler el biocarbón en un triturador, con el objetivo de estandarizar y disminuir el tamaño. Guerra (2015) indica que antes de cada análisis ya sea este para biomasa o biocarbón, las muestras deben ser retornadas a secar a 100 °C para que los resultados obtenidos se reporten sobre un base seca o libre de humedad. A continuación, se describe el procedimiento que se empleó para el análisis elemental de la biomasa.

3.4.1 Análisis elemental: CHN (carbono total, hidrógeno total y nitrógeno).

Para la caracterización química de las muestras de biomasa y biocarbón se utilizó el análisis elemental o último, con el fin de analizar los elementos de carbono total, hidrógeno total, oxígeno, nitrógeno y azufre. Para realizar el análisis elemental se aplicó el método establecido por el protocolo del laboratorio y los reglamentos implícitos en el manual de uso del equipo perteneciente a la corporación LECO, todo el equipo está compuesto por tres módulos y un sistema de software.

En primera estancia se analizó el contenido de carbono total, hidrógeno total y nitrógeno en el analizador elemental LECO CHN Series 628 (Figura 18) que tiene como método de referencia ASTM D5373 (Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke) (Saint, 2013).



Figura 18: Analizador elemental LECO Series CHN 628

El método de detección que se aplicó para el carbono e hidrógeno total fue Non-Dispersive infrared (IR) absorption y para nitrógeno Thermal conductivity (TC Cell) detector (LECO Corporation, 2016). Para la preparación de las muestras se pesó una cantidad de 0.0800 g a 0.0900 g en cápsulas de aluminio como se puede ver en la Figura 19



Figura 19: Pesaje de las muestras de estudio para el análisis elemental CHN

Cada muestra pesada se colocó en la rueda rotatoria (Figura 20) y se anotó los pesos en el software que funciona conjuntamente con el equipo de análisis elemental. Se realizó tres repeticiones por cada variable química analizada.



Figura 20: Rueda rotatoria del analizador elemental con las muestras pesadas

La muestra pesada se colocó en el cargador del instrumento, el equipo la transfiere a un horno primario pasando por una cámara de purga eliminando los gases de transferencia, aquí se presentó la completa e instantánea oxidación mediante una combustión con oxígeno puro, donde el carbono, hidrógeno se oxidaron de forma exotérmica formando dióxido de carbono (CO_2), moléculas de agua (H_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x). La muestra pasó por un segundo horno donde se ocasionó una mayor oxidación y exclusión de partículas para eliminar el vapor de agua, este gas pasó por un enfriador.

Los gases combinados son barridos por un conducto de gas portador, en el proceso se utilizó células infrarrojas no dispersivas optimizadas para la detección de agua y dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno se transportaron por un conducto de reducción lleno de cobre para la obtención del nitrógeno, con la finalidad de que se elimine cualquier exceso de oxígeno que genere combustión el gas alícuota pasó por Lecosorb para eliminar el dióxido de carbono y el agua generada durante el proceso de captura del CO_2 , el equipo tiene una celda de conductividad térmica para detectar nitrógeno (Saint, 2013).

3.4.4 Análisis elemental: oxígeno.

En la medición de la variable de oxígeno total se utilizó cápsulas de estaño, donde se pesó en una balanza 2 mg de cada muestra, como se visualiza en la Figura 21, se efectuó tres repeticiones por cada elemento de estudio.

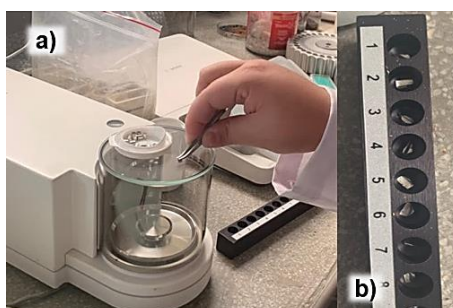


Figura 21: Pesaje de las muestras para el análisis de oxígeno (a) y muestras obtenidas (b)

Luego, se colocó las muestras en el autocargador del módulo de micro-oxígeno LECO Series 628 (Figura 22) y automáticamente caen en el horno de pirólisis a alta temperatura que funciona a 1300 °C. Dentro del horno el oxígeno liberado durante el proceso de pirólisis de la muestra reaccionó con un ambiente rico en carbono para formar monóxido de carbono (CO), este es barrido del horno y convertido a dióxido de carbono (CO₂) antes de la medición, a través del detector infrarrojo.



Figura 22: Módulo de micro-oxígeno LECO Series 628

3.4.5 Análisis elemental: azufre.

Se obtuvo el contenido de este elemento con el módulo de azufre LECO Series 628 (Figura 23) y se aplicó la Norma ASTM D4239 (Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using high-temperature Tubefurnace Combustion).



Figura 23: Módulo de azufre LECO Series 628

El peso de la muestra fue de 0.1500 g a 0.1600 g en barcos de combustión y tres repeticiones por cada tipo de materia prima (biomasa o biocarbón), como se muestra en la Figura 24.

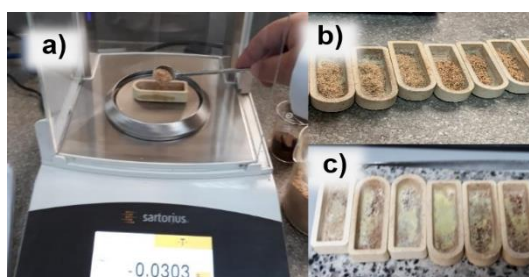


Figura 24: Pesaje de muestras para el análisis de azufre (a), muestras antes (b) y después del proceso de análisis (c)

Como siguiente paso, se introdujo las cápsulas en el módulo de azufre (Figura 25). El análisis comenzó cuando se procedió a colocar las muestras pesadas en el horno y estas combustionaron con el oxígeno puro del equipo regulado a 1350 °C, el azufre dentro de la muestra se desarrolló obteniendo dióxido de azufre (SO₂), por lo cual se analizó el contenido del mismo, los datos se registraron automáticamente en el software del equipo.



Figura 25: Colocación de las muestras en el módulo de azufre

3.4.6 Análisis Termogravimétrico (TGA).

Para la caracterización física de las muestras de biomasa y biocarbón se utilizó el análisis termogravimétrico, con el fin de analizar los parámetros de humedad, contenido volátil, cenizas y carbono fijo. Para realizar este análisis se aplicó la Norma ASTM E1756-08 (Estándar Test Method for Determination of Total Solids in Biomass) y se utilizó el módulo termogravimétrico TGA 701 (Figura 26).



Figura 26: Módulo termogravimétrico TGA 701

Inicialmente, se eligió el método de análisis y se procedió a cargar los crisoles de cerámica vacíos en el carrusel del horno (Figura 27), el equipo registró el peso y se colocó de 0.9 g a un 1 g de cada muestra los valores se almacenaron automáticamente. Una vez que el equipo pesó todos los crisoles con las muestras y se registró la diferencia de los mismos, empezó el análisis desde la temperatura ambiente.

Al final del procedimiento se obtuvo el registro de la pérdida de peso de cada muestra con relación al incremento de la temperatura y los porcentajes de las variables de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo, para lo cual el equipo contiene un programa en el

software, donde se visualizó y registró los resultados. Se realizó tres repeticiones por muestra (LECO Corporation, 2014).



Figura 27: Pesaje de las muestras de materia prima en el módulo termogravimétrico

3.4.7 Análisis de poder calórico.

Se realizó el análisis de poder calórico en base a la Norma ASTM D5865 (Standard test method for the gross calorific value of coal and coke). Posteriormente, se pesó 0.2021 g de las muestras de biomasa y biocarbón en un crisol de níquel como se observa en la Figura 28, por cada muestra se realizó tres repeticiones.



Figura 28: Pesaje de muestras para el análisis de poder calórico

Después, se colocó un fusible de hilo de algodón en cada crisol para poner en contacto la tensión con la muestra (Figura 29).

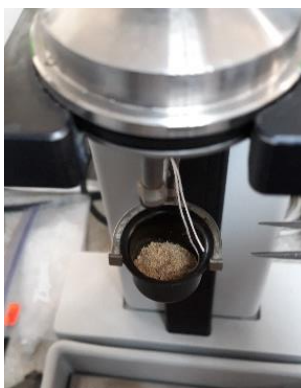


Figura 29: Colocación de la muestra en el vaso de combustión

La muestra pesada se colocó en un vaso de combustión que se presurizó con oxígeno y se verificó el estado de la tensión en el software, posteriormente el vaso de combustión es expuesto a un baño de agua dentro del equipo conocido como balde, cuando terminó el proceso de análisis se descargó el contenido de oxígeno con el equipo de carga y despresurización (Figura 30).



Figura 30: Estación de carga y despresurización de oxígeno

Con ayuda del calorímetro semi-automático LECO AC600 (Figura 31) se calculó el contenido calorífico de la biomasa y biocarbón, para lo cual el equipo midió con precisión el calor liberado después de la combustión de la muestra en un ambiente controlado, el calor liberado es proporcional al valor calorífico de la sustancia, los resultados se visualizan en el software del equipo (LECO Corporation, 2015).



Figura 31: Calorímetro semi-automático LECO AC600

3.4.8 Relación Carbono - Nitrógeno (C / N).

Para el cálculo de la relación C / N se aplicó la metodología de Guerra (2015), la misma que consistió en la división del contenido de nitrógeno y del contenido de carbono total de la biomasa, ambos expresados en porcentaje, como se puede observar en la fórmula a continuación. Igualmente, Martínez (2015) indica que la relación C / N se obtiene dividiendo los porcentajes del carbono y nitrógeno, adquiridos en la caracterización de la biomasa.

$$Relación\ C/N\ (\%) = \frac{Nitrógeno\ (\%)}{Carbono\ total\ (\%)}$$

3.4.9 Metodología aplicada para la producción de biocarbón

Para la producción de biocarbón se utilizó el equipo Termogravimétrico - TGA701 y el método de torrefacción manejado por el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina, con la finalidad de establecer la temperatura de torrefacción se empleó la metodología propuesta por Bermeo (2018), por tal motivo en la producción del biocarbón se consideraron parámetros como el tiempo y la temperatura, en pro de ello, la temperatura de torrefacción aplicada fue de 300 °C y el tiempo de duración fue de dos horas. Al respecto, Castro (2018) menciona que el proceso de elaboración se deberá realizar a bajas temperaturas para obtener una mayor producción de biocarbón.

Para continuar con la elaboración de biocarbón se verificó el porcentaje de humedad obtenido de la caracterización de la biomasa, debido a que los investigadores Atuesta & Sierra (2015) manifiestan que el porcentaje de humedad debe ser inferior al 10 %, caso contrario Manals et al. (2011) y Sun et al. (2017) recomiendan aplicar el método de beneficio seco hasta que se cumpla con este parámetro, el cual consiste en secar las muestras en una estufa a 105 °C hasta obtener un porcentaje menor.

3.4.10 Método de torrefacción.

Durante el procedimiento de la elaboración del biocarbón se pudo determinar cinco etapas en el método de torrefacción: en la etapa inicial de calentamiento o pre-secado la biomasa se calentó desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente los 100 °C. En la segunda etapa, el secado de la biomasa ocurrió a temperatura constante hasta que la humedad superficial se removió completamente, posteriormente la humedad intraparticular comenzó a eliminarse, donde alcanzó un porcentaje crítico, en la siguiente etapa de post-secado la temperatura se incrementó hasta llegar a los 300 °C, en esta parte del proceso de acuerdo con Arteaga et al. (2015) en su investigación sobre los "*Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica*" hacen referencia a que toda la humedad físicamente enlazada y algunos compuestos orgánicos ligeros se separan de la biomasa. En la siguiente etapa de torrefacción ocurrió la despolimerización de la biomasa, el grado de polimerización dependió de la temperatura de torrefacción y el tiempo de residencia, por lo que la combinación de ambos parámetros definió los rendimientos alcanzados.

En la última etapa se dejó enfriar el biocarbón obtenido (Figura 32), para luego extraerlo del equipo, debido a que podría combustionar al contacto con el aire. De igual forma, en el trabajo realizado por Bermeo (2018) con relación al método de torrefacción la temperatura aplicada se encuentra entre los 300 °C y se realiza en una atmósfera libre de oxígeno para

obtener biocarbón, mediante el método de torrefacción seca. Arteaga et al. (2015) señalan en su estudio sobre el “Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus radiata*” que el método de torrefacción es un pre tratamiento químico, en el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente a medida que se calienta (< 50 °C / min) hasta llegar a los 200 °C - 300 °C.



Figura 32: Biocarbón de álamo blanco (a) y molle (b)

A continuación, en la Tabla 12 y 13 se dan a conocer los datos del peso inicial de la biomasa, registrados por el módulo TGA en la producción del biocarbón de álamo blanco y molle.

Tabla 12: Peso inicial en (g) de la biomasa residual de álamo blanco para obtener biocarbón

Código de Laboratorio	Tipo de residuo	Masa inicial (g)
T3UBE_0052	Rama Podada	96.51
T3UBE_0052	Rama Podada	97.35
T3UBE_0052	Rama Podada	98.61
T3UBE_0052	Rama Podada	99.39
T3UBE_0052	Rama Podada	94.01
T3UBE_0052	Rama Podada	93.38
T3UBE_0052	Rama Podada	93.21
T3UBE_0052	Rama Podada	106.05
T3UBE_0052	Rama Podada	96.05
Total		874.56

Tabla 13: Peso inicial en (g) de la biomasa residual de molle utilizada para obtener el biocarbón

Código de Laboratorio	Tipo de residuo	Masa inicial (g)
T3UBE_0053	Rama Podada	91.13
T3UBE_0053	Rama Podada	91.08
T3UBE_0053	Rama Podada	91.50
T3UBE_0053	Rama Podada	91.61
T3UBE_0053	Rama Podada	91.25
T3UBE_0053	Rama Podada	90.21
T3UBE_0053	Rama Podada	91.63
T3UBE_0053	Rama Podada	91.01
Total		821.06

Para la determinación del pH del biocarbón se consideró la técnica de humedecimiento del biochar propuesto por Mclaughlin et al. (2009) sobre una solución simple de biochar – agua (1:10) (p/v), es decir 1 g de biocarbón con 10 ml de agua destilada, se midió con un pH-metro y papel pH.

3.4.11 Rendimiento másico del biocarbón.

El rendimiento másico se calculó de acuerdo con la fórmula que propone Bermeo (2018).

$$R = \frac{W_0}{W_f} \cdot 100$$

Donde:

- R: Rendimiento másico (%)
- W_0 : Peso de la muestra sin torrefactar (masa inicial) (g)
- W_f : Peso de la muestra torrefactada (masa final) (g)

De igual forma Guerra (2015) señala que el rendimiento másico del biocarbón se calcula mediante la relación existente de la materia prima (biomasa seca) con el valor del peso final del producto (biocarbón seco).

3.4.12 Diseño experimental de los ensayos para el crecimiento de las plántulas.

Para evaluar la interacción biocarbón – planta y el efecto sobre el crecimiento de plántulas de girasol (*Helianthus annuus*), se incorporó un diseño factorial de tres factores biocarbón de molle (M1), álamo blanco (M2) y testigo (T1) que presentan los tratamientos y dos tipos de dosis: 1:10 (D1) y 1:5 (D2) obteniendo así seis sustratos (M1D1, M1D2, M2D1, M2D2, T1D1 y T1D2), por cada uno se realizó cuatro repeticiones como se da a conocer en la Figura 33, alcanzando 24 unidades experimentales.

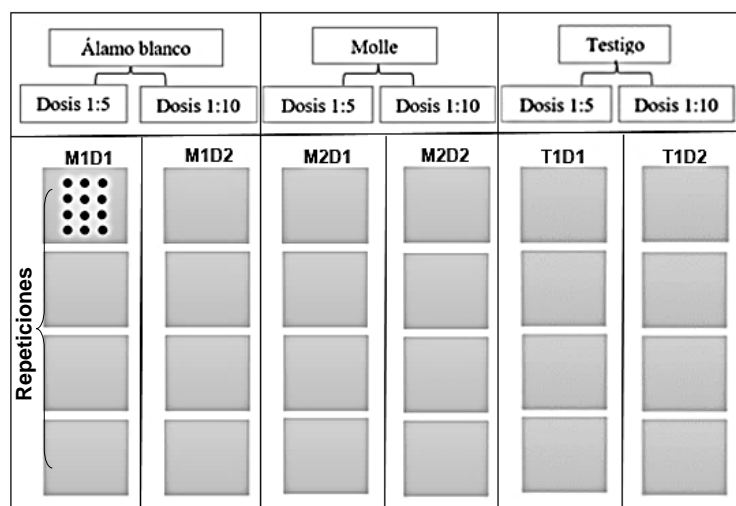


Figura 33: Diseño del croquis de las unidades experimentales

3.4.13 Ensayos efectuados para analizar el crecimiento de las plántulas de girasol.

Para determinar la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol se utilizó la metodología aplicada por Gilces (2014) que estableció diluciones de peso / volumen (w/v) en la siguiente relación: dilución en extracto acuoso de 1:10 y 1:5, para diluciones de agua desionizada y biocarbón, en base a los valores expuestos en la Tabla 14.

Tabla 14: Concentración y tipo de dosis para las diluciones

Dosis	Fase sólida	Fase líquida
	Biocarbón (g)	Agua desionizada (ml)
Baja	1	10
Alta	1	5

Fuente: Arévalo (2019)

3.4.14 Preparación de diluciones.

La dilución hace referencia a una solución de un sólido y solvente que se diluye para volver más débil la solución, como se puede observar en la Figura 34. En la solución de 1:10 se utilizó una parte del soluto más nueve partes del diluyente, por lo tanto, se aplicó 10 g de biocarbón de álamo blanco más 100 ml de agua desionizada diariamente, este procedimiento se repitió para la formación de las diluciones con el biocarbón de molle (Figura 35).



Figura 34: Proceso de formación de la dilución 1:10 con biocarbón de álamo blanco

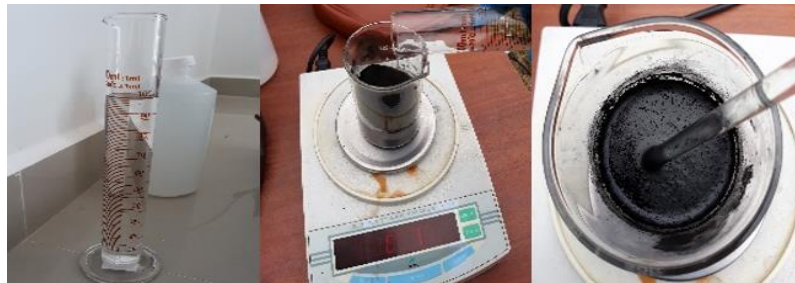


Figura 35: Proceso de formación de la dilución 1:10 con biocarbón de molle

De igual modo, para la preparación de la segunda dilución se utilizó 10 g de biocarbón más 50 ml de agua desionizada, este procedimiento se realizó con el biocarbón de álamo blanco (Figura 36) y molle (Figuras 37).

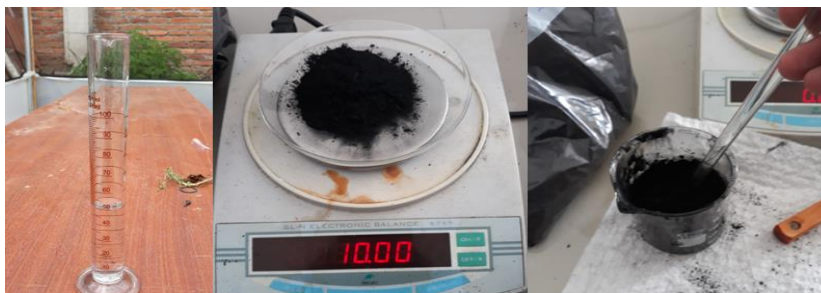


Figura 36: Proceso de formación de la dilución 1:5 con biocarbón de álamo blanco



Figura 37: Proceso de formación de la dilución 1:5 con biocarbón de álamo blanco

3.4.15 Formación de las unidades experimentales.

Como se puede observar en la Tabla 15 se obtiene tres tipos de tratamientos: molle (M1), álamo blanco (M2), testigo (T1) y dos tipos de dosis 1:10 (D1) y 1:5 (D2), de esta forma obteniendo seis tipos de sustratos. Por cada tipo de sustrato se optó realizar cuatro

repeticiones, según recomienda Herrera (2018), obteniendo así un total de 24 unidades experimentales.

Tabla 15: Codificación de las unidades experimentales

Tratamientos	Dilución	Sustratos
Molle (M1)	D1 - 1:10	M1D1
	D2 - 1:5	M1D2
Álamo blanco (M2)	D1 - 1:10	M2D1
	D2 - 1:5	M2D2
Testigo (T1)	D1 - 1:10	T1D1
	D2 - 1:5	T1D2

Siguiendo la metodología aplicada por Arévalo (2019) los diferentes sustratos (M1D1, M1D2, M2D1, M2D2, T1D1 y T1D2) se colocaron sobre papel absorbente para conservar la humedad y en bandejas, en este caso fueron de aluminio de 27 x 30 cm por cada unidad experimental se colocó 20 semillas, obteniendo un total 480 semillas distribuidas en las bandejas a una distancia de 3 cm entre cada una (Figura 38).



Figura 38: Distribución de las semillas en cada unidad experimental

A continuación, se presentan las 24 unidades experimentales en la Figura 39, donde se visualiza cada sustrato y réplicas.

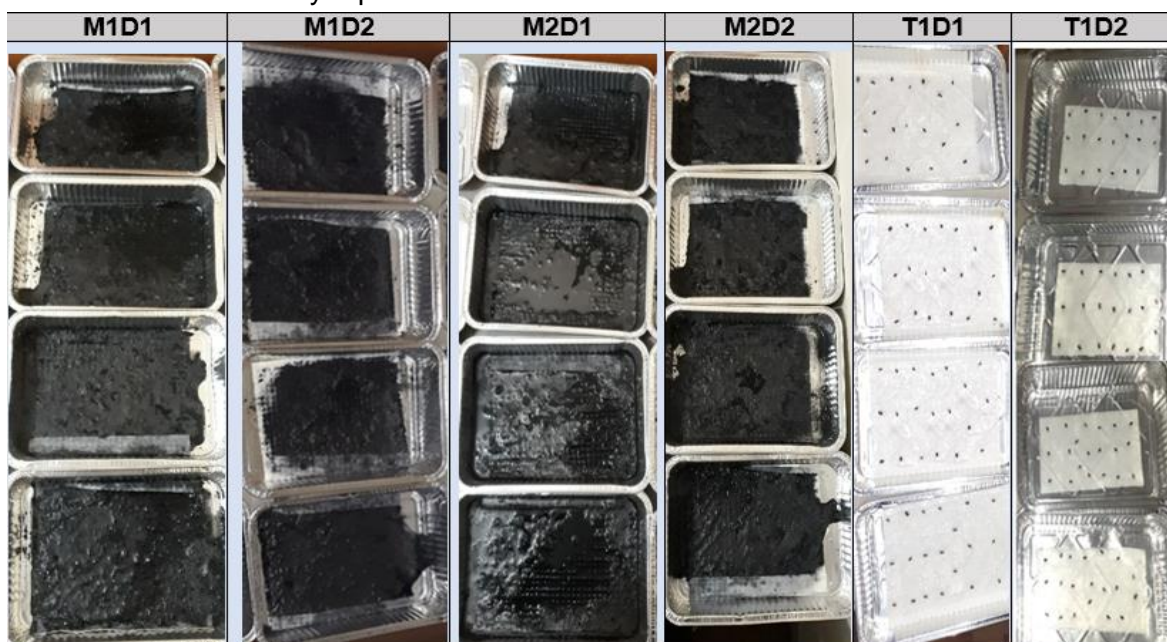


Figura 39: Unidades experimentales con sus respectivos tipos de sustratos

3.4.16 Registro de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol.

En base a la metodología de Abenza (2005) la prueba inicial de observación consistió en realizar un conteo visual sobre el número de plántulas germinadas en cada uno de las unidades experimentales en la primera semana (Figura 40) con el fin de identificar la cantidad de semillas germinadas, posteriormente para obtener uniformidad de los datos y evitar alteraciones en la tasa de crecimiento semanal entre los sustratos, se procedió a extraer las semillas que no germinaron durante la primera semana para igualar el número de plántulas en todas las bandejas, según Herrera et al. (2018) indica que una semilla se considera germinada cuando la radícula es mayor a 2 mm, obteniendo una base de 12 semillas por unidad experimental en total 288 semillas germinadas.

El tiempo de experimentación se basó en la metodología aplicada por Herrera et al. (2018) que midió el crecimiento del tallo de la plántula hasta los 15 cm aproximadamente, por ello se implementó una tabla de registro semanal, donde se anotó los porcentajes de la tasa de crecimiento de las plántulas de girasol durante el tiempo de experimentación que fue de ocho semanas, debido que las plántulas de girasol en ese lapso de tiempo alcanzaron la longitud de medición recomendada.

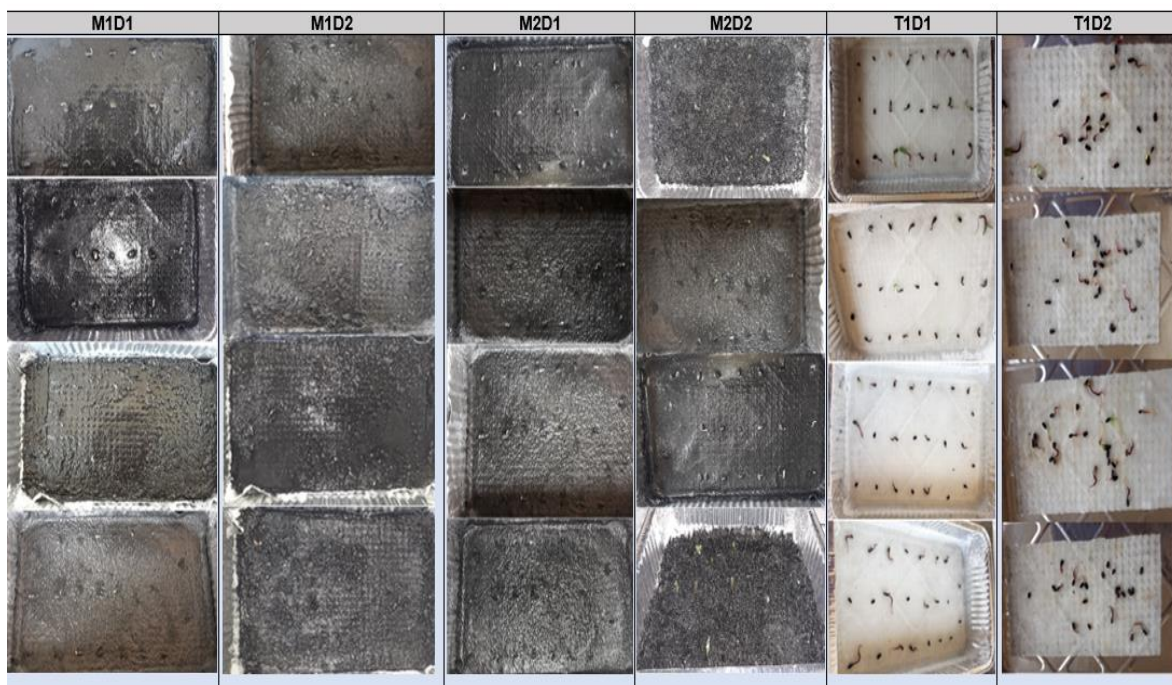


Figura 40: Germinación de las semillas de girasol (*Helianthus annuus*) en la primera semana

A continuación, en la Tabla 16 se visualiza los porcentajes obtenidos de la tasa de crecimiento del tallo de las plántulas en la primera semana, las tablas de registro de las siguientes semanas se exponen en la parte de Anexos del 2 al 9.

Tabla 16: Registro de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol en (cm)

Semana	Biocarbón	Dosis	Nº semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
Primera semana	Molle (M1)	Dosis I (D1)	1	0.4	0.6	0.4	0.7
			2	0.4	0.6	0.5	0.7
			3	0.6	0.7	0.4	0.4
			4	0.5	0.4	0.6	0.5
			5	0.6	0.7	0.5	0.7
			6	0.4	0.6	0.5	0.6
			7	0.6	0.6	0.7	0.4
			8	0.7	0.4	0.6	0.7
			9	0.6	0.6	0.5	0.5
			10	0.5	0.4	0.4	0.6
			11	0.6	0.5	0.6	0.7
			12	0.7	0.4	0.5	0.5
Primera semana	Molle (M1)	Dosis II (D2)	1	0.6	0.6	0.7	0.6
			2	0.9	0.8	0.6	0.8
			3	0.6	0.6	0.8	0.7
			4	0.7	0.7	0.7	0.6
			5	0.7	0.6	0.7	0.8
			6	0.8	0.7	0.8	0.7
			7	0.8	0.7	0.6	0.7
			8	0.9	0.8	0.6	0.6
			9	0.6	0.7	0.8	0.9
			10	0.8	0.8	0.9	0.7
			11	0.7	0.9	0.7	0.5
			12	0.8	0.6	0.7	0.6
Primera semana	Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	1.0	1.0	0.8
			2	0.8	1.0	0.8	1.0
			3	1.1	0.8	1.0	1.1
			4	0.8	1.0	1.1	0.9
			5	1.0	0.9	0.9	0.8
			6	1.0	0.8	0.9	1.0
			7	0.8	0.8	1.0	1.0
			8	0.9	1.1	1.1	1.1
			9	1.1	0.9	0.8	0.9
			10	0.8	0.8	1.0	0.8
			11	0.9	1.0	0.8	1.0
			12	1.0	0.8	1.1	0.8
Primera semana	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	1	1.2	1.4	1.4	1.4
			2	1.1	1.4	1.4	1.4
			3	1.2	1.5	1.2	1.6
			4	1.2	1.2	1.4	1.2
			5	1.3	1.2	1.4	1.4
			6	1.2	1.4	1.2	1.3
			7	1.4	1.2	1.4	1.4
			8	1.2	1.4	1.5	1.4
			9	1.4	1.2	1.4	1.2

Continuación de la Tabla 16

Semana	Biocarbón	Dosis	Nº de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
			10	1.2	1.4	1.4	1.2
			11	1.5	1.2	1.2	1.5
			12	1.6	1.4	1.4	1.2
			1	0.5	0.3	0.3	0.3
			2	0.3	0.2	0.4	0.3
			3	0.4	0.2	0.2	0.5
			4	0.2	0.3	0.4	0.3
			5	0.3	0.4	0.3	0.4
			6	0.4	0.2	0.5	0.2
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	7	0.3	0.3	0.4	0.2
			8	0.5	0.4	0.3	0.3
			9	0.2	0.2	0.4	0.5
			10	0.4	0.4	0.5	0.3
			11	0.2	0.2	0.4	0.4
			12	0.4	0.3	0.3	0.3
			1	0.4	0.4	0.3	0.2
			2	0.4	0.3	0.4	0.4
			3	0.5	0.5	0.4	0.5
			4	0.3	0.3	0.5	0.3
			5	0.3	0.5	0.3	0.4
Primera semana	Testigo (T1)	Dosis II (D2)	6	0.5	0.4	0.5	0.4
			7	0.4	0.5	0.5	0.4
			8	0.4	0.4	0.5	0.3
			9	0.3	0.3	0.4	0.5
			10	0.4	0.5	0.5	0.4
			11	0.4	0.5	0.5	0.5
			12	0.3	0.3	0.4	0.3

Para obtener la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol se midió con una regla la longitud del tallo en centímetros, como se muestra en la Figura 41, de acuerdo con el procedimiento que aplicó Arévalo (2019) en su estudio.



Figura 41: Medición del tallo para el registro de la tasa de crecimiento semanal

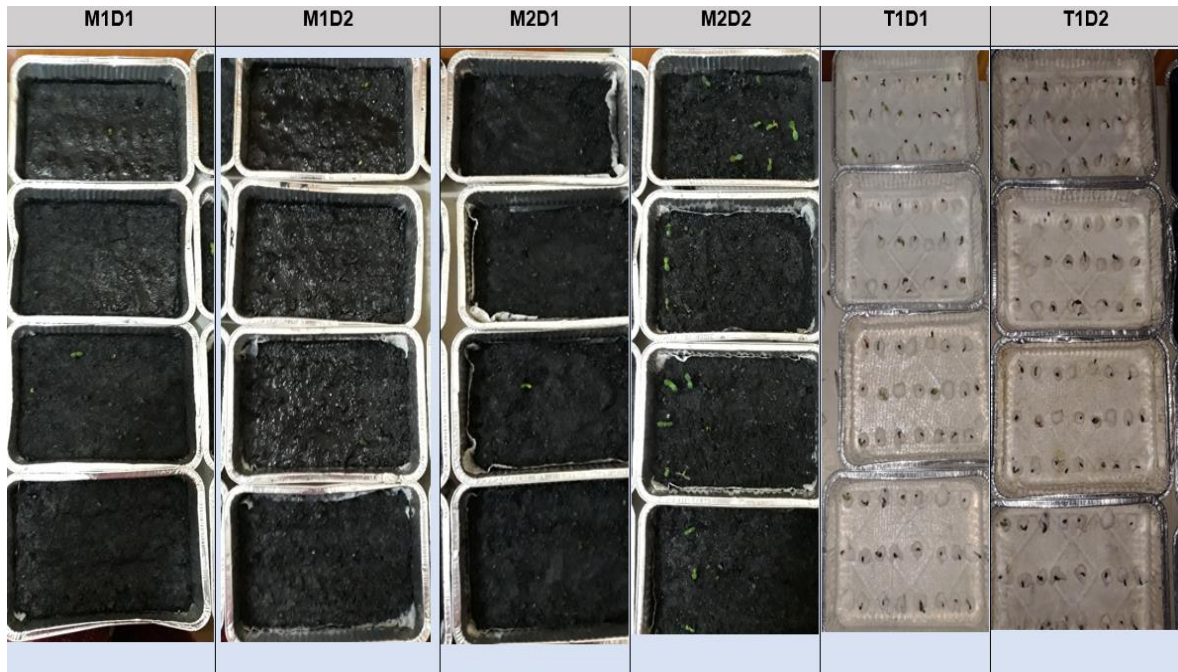


Figura 43: Crecimiento de las plántulas de girasol (*Helianthus annus*) en la segunda semana de experimentación

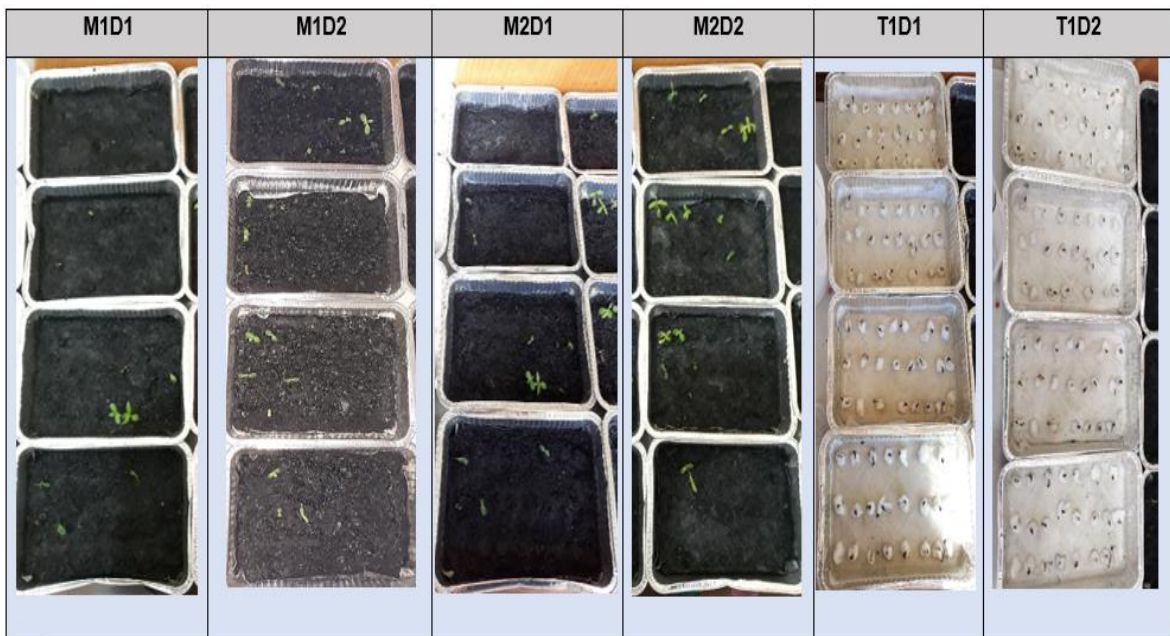


Figura 42: Crecimiento de las plántulas de girasol (*Helianthus annus*) en la cuarta semana de experimentación

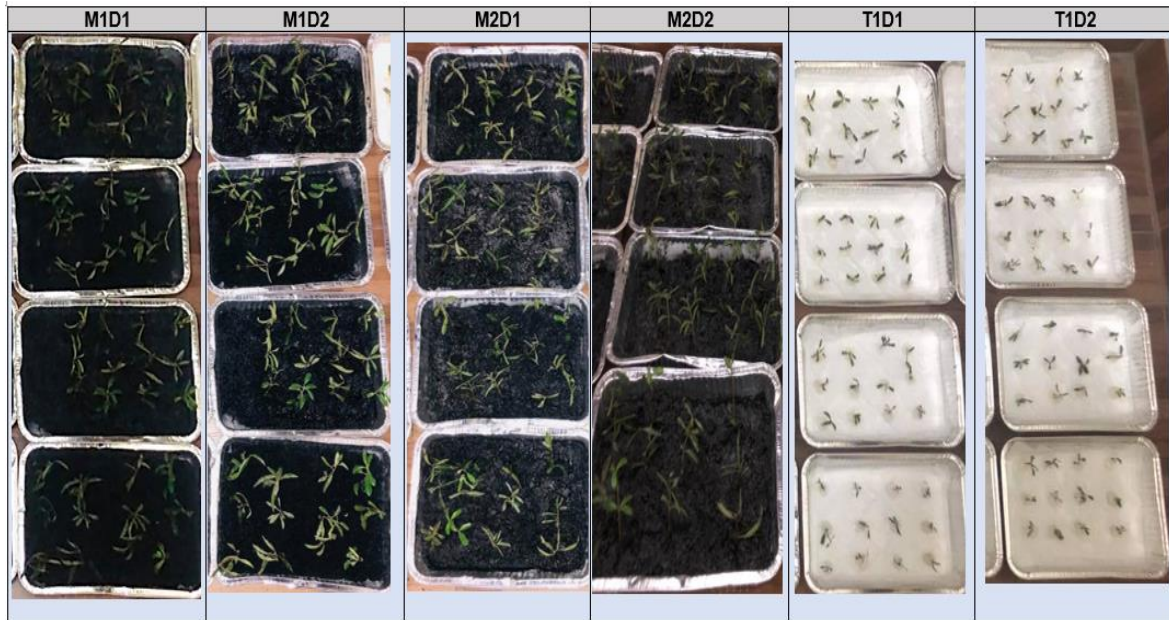


Figura 44: Crecimiento de las plántulas de girasol (*Helianthus annuus*) al final de la experimentación en la octava semana de experimentación

3.4.17 Métodos estadísticos aplicados

El análisis respectivo de los resultados obtenidos en la caracterización química y física de la biomasa y biocarbón de las especies de molle y álamo blanco, se realizó mediante el análisis descriptivo, para lo cual, se estableció estadísticos de tendencia central: media, mediana y dispersión de datos como la desviación estándar (DE), coeficiente de variación y error estándar (EE), también se realizó una gráfica de boxplot por cada tipo de variable para identificar valores atípicos y visualizar las distribuciones de datos, mediante el análisis del error estándar se determinó la viabilidad o variación aleatoria de los resultados obtenidos al repetir una prueba en las mismas condiciones, se estableció un margen de error mediante la formación de intervalos, el rango de error se pudo comprobar gráficamente.

Posteriormente, para identificar el mejor tratamiento y tipo de dosis, que presentó un mayor crecimiento de las plántulas de girasol en las pruebas de experimentación se utilizó el análisis de varianza factorial ANOVA de 2 x 3, para lo cual se estableció dos niveles (Diluciones de 1:5 y 1:10) y tres factores (Tratamiento de biocarbón de álamo blanco, molle y testigo), donde se planteó una hipótesis nula (H_0): el promedio de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol en los tres tratamientos es igual y alternativa (H_1): el promedio de la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de girasol es distinto o diferente, en al menos un tipo de tratamiento.

De igual manera, se procedió a elaborar gráficas de interacción, las mismas que sirvieron para identificar el tratamiento con relación al tipo de sustrato (dilución acuosa de 1:5 o 1:10) que mejor reaccionó en el crecimiento del tallo de las plantas, para comprobar el resultado obtenido se empleó un análisis de ANOVA simple. Todo el análisis estadístico realizado durante esta investigación se efectuó con el programa RStudio.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización química y análisis estadístico de la biomasa

La caracterización química de los residuos lignocelulósicos procedentes de la biomasa residual de la poda de árboles, se llevó a cabo mediante la determinación del contenido de los elementos de carbono total, hidrógeno total, oxígeno, nitrógeno y azufre, en este análisis se efectuaron tres repeticiones (I, II, III) por cada variable química. En la tabla 17 y 18 se dan a conocer los resultados obtenidos en el análisis elemental de la biomasa residual de álamo blanco y molle.

Tabla 17: Resultados del análisis elemental de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje

Variables químicas	Repeticiones		
	I	II	III
Carbono	45.258	44.207	44.620
Hidrogeno	6.459	6.343	6.413
Oxigeno	18.570	19.125	20.332
Nitrógeno	1.037	1.022	1.066
Azufre	0.123	0.116	0.124

Tabla 18: Resultados del análisis elemental de la biomasa residual de molle en porcentaje

Variables químicas	Repeticiones		
	I	II	III
Carbono	44.310	44.312	44.070
Hidrogeno	6.357	6.352	6.329
Oxigeno	20.244	18.367	18.966
Nitrógeno	0.734	0.773	0.821
Azufre	0.329	0.318	0.332

En la Tabla 19 y 20 se visualiza los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos ¹, que se desarrollaron en base a los porcentajes de la prueba elemental de laboratorio aplicado a las dos especies de biomasa de estudio, para lo cual se estableció medidas de tendencia central y dispersión de datos.

¹ Estadísticos de tendencia central (Media y Mediana) e indicadores de dispersión como la desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE).

Tabla 19: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química de la biomasa de álamo blanco

Variables químicas	Media	Mediana	DE	CV	EE
Carbono	44.69	44.620	0.529	1.184	0.305
Hidrogeno	6.405	6.413	0.058	0.907	0.033
Oxigeno	19.342	19.125	0.900	4.657	0.520
Nitrógeno	1.042	1.037	0.022	2.137	0.012
Azufre	0.121	0.123	0.004	3.552	0.002

Tabla 20: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química de la biomasa de molle

Variables químicas	Media	Mediana	DE	CV	EE
Carbono	44.230	44.310	0.139	0.314	0.080
Hidrogeno	6.346	6.352	0.015	0.239	0.008
Oxigeno	19.192	18.966	0.958	4.995	0.553
Nitrógeno	0.776	0.773	0.043	5.599	0.025
Azufre	0.326	0.329	0.007	2.274	0.004

A continuación, se realizó una evaluación individual de cada variable química para analizar y comparar los resultados obtenidos sobre el contenido elemental de la biomasa residual de álamo blanco y molle.

4.1.1 Carbono total.

En la Tabla 21 se exponen los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de carbono total presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle

Tabla 21: Porcentajes del contenido de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	45.258	44.207	44.620
Molle	44.310	44.312	44.070

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 45) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de carbono total que posee la biomasa residual.

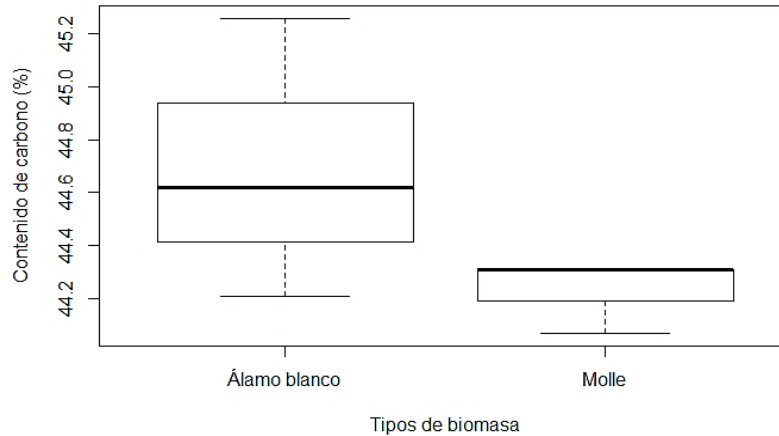


Figura 45: Box-plot de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de carbono total de las dos especies de biomasa.

Tabla 22: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	44.695	44.620	0.529	1.184	0.305
Molle	44.230	44.310	0.139	0.314	0.080

De acuerdo, con el análisis descriptivo realizado en esta variable, la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 44.69 % con un error estándar² (EE) de 0.30 %, que resulta en un intervalo estimado de [44.39 %, 44.99 %], mientras que en la especie de molle se tiene un valor promedio de 44.23 % con un error estándar (EE) de 0.08 %, que corresponde a un intervalo de [44.15 %, 44.31 %].

Por lo tanto, se puede asumir que esta especie arbórea presenta menor variabilidad en la experimentación entre los resultados obtenidos con relación al contenido de carbono total, esto se puede comprobar en la Figura 46, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de carbono de cada una de las especies de estudio.

² El error estándar mide la diferencia que puede existir entre la media y la estadística que se informa.

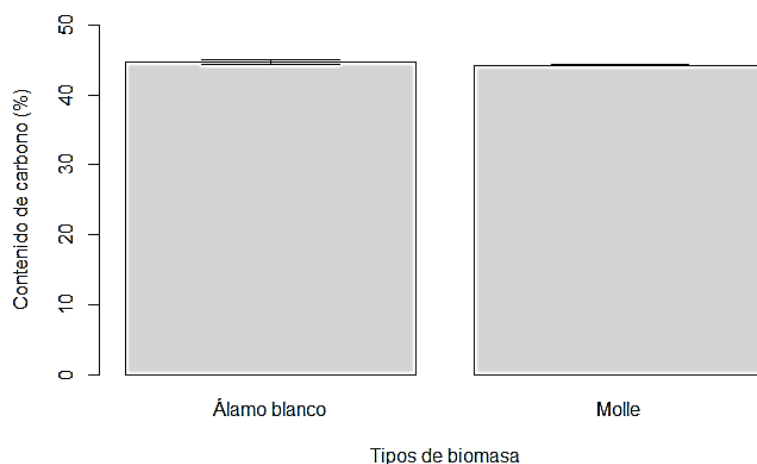


Figura 46: Error estándar (EE) de los porcentajes de carbono total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Manals et al. (2011) obtiene un porcentaje del 47.9 % en la caracterización de la biomasa residual de pino, de igual forma Pérez (2016) en su investigación tiene un promedio de 49.41% en el contenido de carbono aplicado a la especie de álamo, Arteaga et al. (2012) en la caracterización de la especie de acacia tiene un porcentaje de 45.4 %, dando a conocer que los valores alcanzados con relación al contenido de este elemento en la biomasa de álamo blanco y molle de 44.19 % y 44.23 % respectivamente, se encuentran en rangos similares por lo tanto, las dos especies presentan viabilidad para la producción de biocarbón.

4.1.2 Hidrógeno total.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de hidrógeno total presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 23.

Tabla 23: Porcentajes del contenido de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	6.459	6.343	6.413
Molle	6.357	6.352	6.329

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 47) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de hidrógeno total que tiene la biomasa residual de álamo blanco y molle.

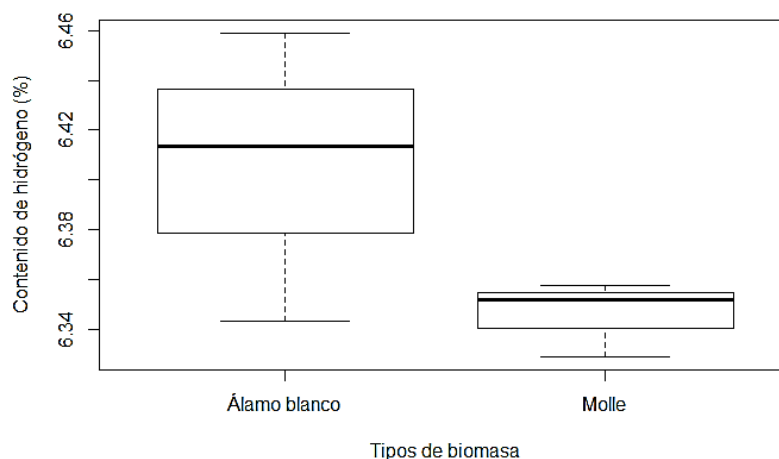


Figura 47: Box-plot de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de hidrógeno total de las dos especies de biomasa.

Tabla 24: Análisis descriptivo de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	6.4054	6.4135	0.0581	0.9075	0.0336
Molle	6.3464	6.3522	0.0152	0.2394	0.0088

De acuerdo, con los resultados obtenidos en el contenido de hidrógeno total, la especie de álamo blanco presenta un valor promedio de 6.40 % con un error estándar (EE) de 0.03 %, que resulta en un intervalo de [6.37 %, 6.43 %]. Sin embargo, la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 6.34 % con un error estándar (EE) de 0.008 %, que corresponde a un intervalo de [6.332 %, 6.348 %].

Por lo tanto, los porcentajes alcanzados en el contenido de hidrógeno con relación a la biomasa de álamo blanco y molle, se encuentran en rangos similares, es decir presentan una menor variabilidad en los resultados obtenidos durante la experimentación. Esto se puede comprobar en la Figura 48, donde se realizó una gráfica a partir del error estándar que presentan los porcentajes alcanzados en el contenido de hidrógeno de cada uno de los tipos de biomasa de estudio.

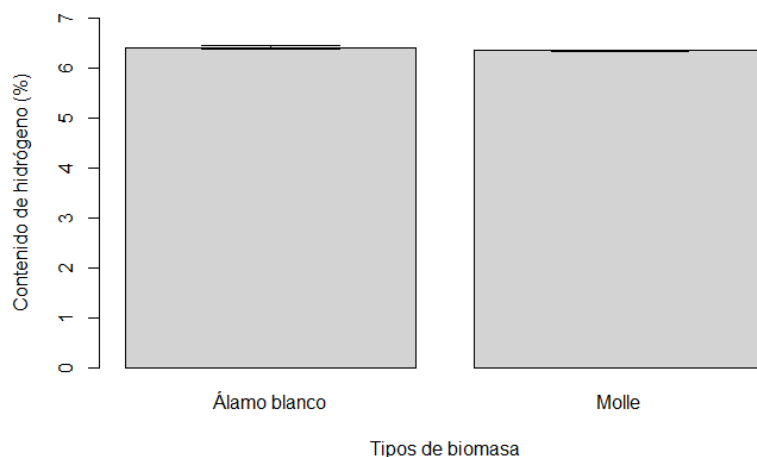


Figura 48: Error estándar (EE) de los porcentajes de hidrógeno total de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la investigación de Manals et al. (2011) realizado con aserrín de pino se obtiene un porcentaje de 6.72 % en el contenido de hidrógeno total, este resultado tiene similitud con el promedio obtenido de 6.40 % en la especie de álamo blanco y 6.34 % en la especie de molle, por su parte, Castro (2018) obtiene un promedio de 5.51 % en la biomasa de pino. Por otro lado, los autores Arteaga-Crespo et al. (2012) en su trabajo de investigación realizado con aserrín de acacia adquirieron un porcentaje de 6.30% en el contenido de hidrógeno, la diferencia existente entre los porcentajes puede ser debido a la estructura o composición del tipo de especie arbórea.

4.1.3 Oxígeno.

En la Tabla 25 se exponen los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de oxígeno presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 25: Porcentajes del contenido de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	18.570	19.125	20.332
Molle	20.244	18.367	18.966

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 49) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de oxígeno que posee la biomasa residual de estudio.

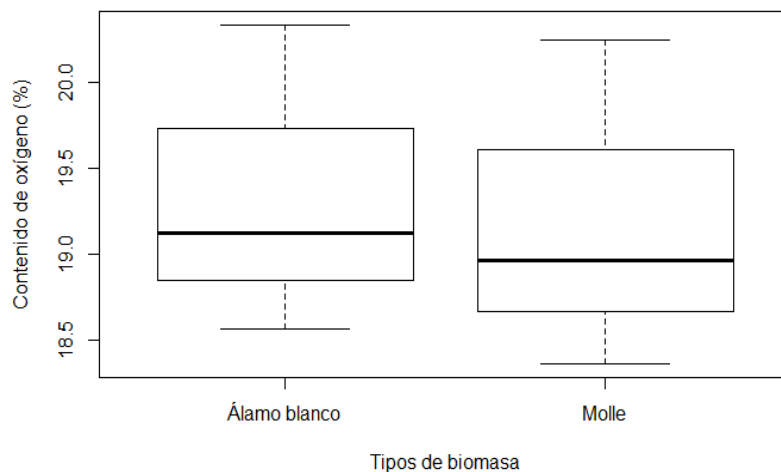


Figura 49: Box-plot de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos en los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se realizaron en base a los porcentajes obtenidos del contenido de oxígeno de las dos especies de biomasa residual.

Tabla 26: Análisis descriptivo de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	19.3423	19.1250	0.9009	4.6576	0.5201
Molle	19.1923	18.9660	0.9588	4.9955	0.5535

La variable de oxígeno en la biomasa residual de álamo blanco presenta una media aritmética de 19.34 % con un error estándar (EE) de 0.52 %, que resulta en un intervalo estimado de [18.82 %, 19.86 %], por lo contrario la especie arbórea de molle tiene un valor promedio de 19.19 % con un error estándar (EE) de 0.55 % que corresponde a un intervalo de [18.64 %, 19.74 %]. Por lo cual, se asume que la especie de álamo blanco presenta una mejor aptitud, debido a que los resultados obtenidos de la experimentación poseen una menor variabilidad, no obstante, los promedios adquiridos en el contenido de oxígeno de las dos especies de estudio se encuentran en rangos similares, esto se puede comprobar en el boxplot de la Figura 50.

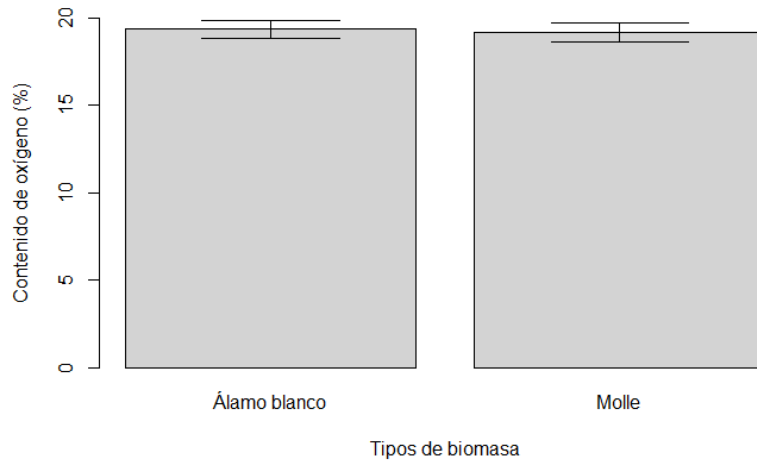


Figura 50: Error estándar (EE) de los porcentajes de oxígeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Martínez (2015) expresa que la biomasa de álamo tiene un porcentaje del 21 % en el contenido de oxígeno y Manals et al. (2011) menciona que obtuvo un porcentaje de 28.3% en cascarón de coco, estos resultados tienen similitud con relación a los valores obtenidos en la experimentación de las especies de álamo blanco y molle, donde se tiene un promedio del 19 % aproximadamente. Medir este elemento es de suma importancia para la producción del biocarbón dependiendo del método utilizado en la elaboración, debido a que el oxígeno ayuda a combustionar la biomasa, por ello a mayor nivel de oxígeno menor deberá ser el tiempo de combustión.

4.1.4 Nitrógeno.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de nitrógeno presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 27.

Tabla 27: Porcentajes del contenido de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	1.037	1.022	1.066
Molle	0.734	0.773	0.821

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 51) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de nitrógeno que posee la biomasa residual de estudio.

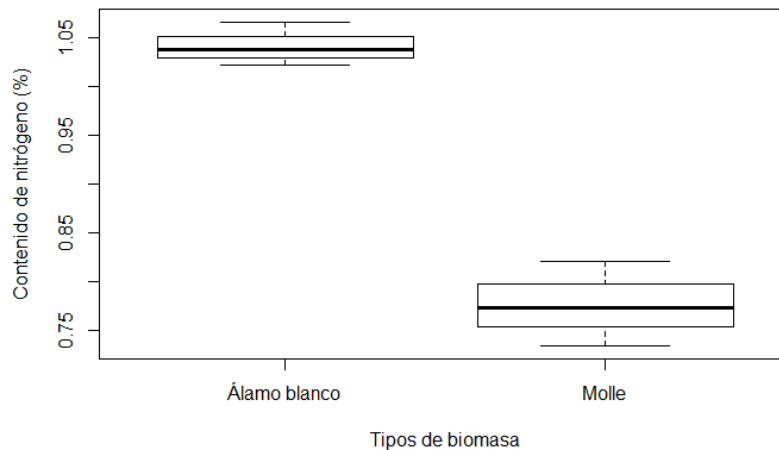


Figura 51: Box-plot de los porcentajes de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 28 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido de nitrógeno de las dos especies de biomasa.

Tabla 28: Análisis descriptivo de los porcentajes de nitrógeno de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	1.0422	1.0375	0.0223	2.1377	0.0129
Molle	0.7766	0.7737	0.0435	5.5990	0.0251

En el contenido de nitrógeno la biomasa residual de álamo blanco posee un promedio del 1.04 % con un error estándar (EE) de 0.012 %, que resulta en un intervalo de [1.028 %, 1.052 %], mientras que la biomasa residual de molle tiene un porcentaje de 0.77 % con un error estándar (EE) de 0.025 %, que corresponde a un intervalo de [0.75 %, 0.79 %], al comparar las dos especies de estudio se asume que el álamo blanco presenta menor variabilidad en la experimentación, esto se puede comprobar en el gráfico de la Figura 52, que se elaboró a partir del error estándar de los valores obtenidos en el contenido de oxígeno de la biomasa de estudio.

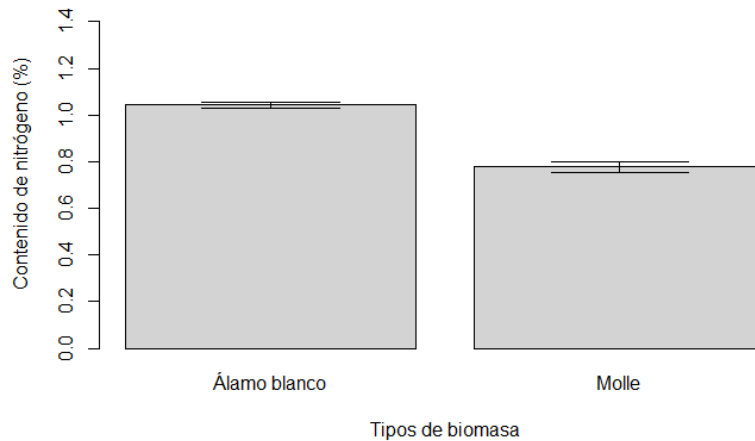


Figura 52: Error estándar (EE) del contenido de nitrógeno total en porcentaje de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Los porcentajes obtenidos de las dos especies arbóreas de estudio (álamo blanco y molle) son similares con respecto a los resultados obtenidos en la prueba elemental, lo que puede garantizar que estos dos tipos de sustratos son óptimos para la producción de biocarbón, debido a que tienen un mayor contenido de carbono y un mínimo porcentaje de nitrógeno en la relación C / N. Pérez (2016) obtiene un porcentaje de 1.4 % en la especie de álamo, lo cual indica una relación entre los resultados obtenidos con respecto a la especie de molle que tiene un valor del 0.77 %. Del mismo modo, Castro (2018) señala que en la biomasa de pino obtuvo un porcentaje del 0.93 % en el contenido de nitrógeno.

4.1.5 Azufre.

En la Tabla 29 se exponen los resultados conseguidos en el análisis elemental con respecto al contenido de azufre presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 29: Porcentajes del contenido de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	0.123	0.116	0.124
Molle	0.329	0.318	0.332

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 53) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de azufre que posee la biomasa residual de álamo blanco y molle.

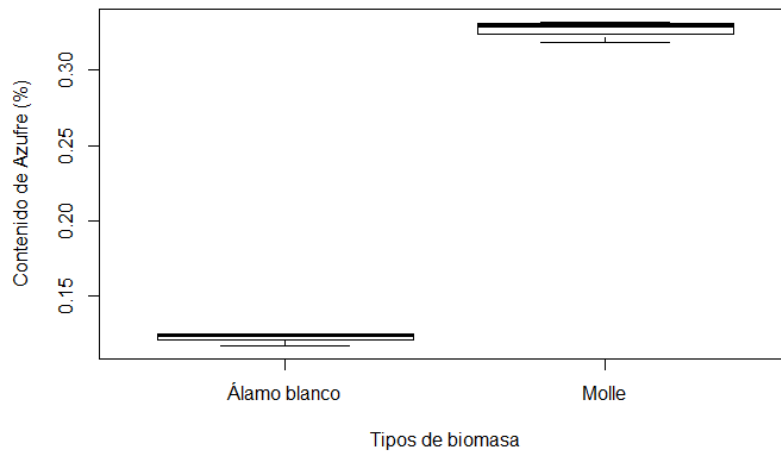


Figura 53: Box-plot de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados en el contenido de azufre de las especies de biomasa de estudio.

Tabla 30: Análisis descriptivo de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	0.1218	0.1238	0.0043	3.5527	0.0025
Molle	0.3268	0.3298	0.0074	2.2742	0.0043

El contenido de azufre presente en la especie arbórea de álamo blanco posee un valor promedio de 0.12 % con un error estándar (EE) de 0.002 %, que corresponde a un intervalo de [0.118 %, 0.122 %]. Por lo contrario, en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 0.32 % con un error estándar (EE) de 0.004 % que resulta en un intervalo de [0.316 %, 0.324 %], por ello se asume que la especie de álamo blanco presenta menor variabilidad en la experimentación y bajo contenido de azufre con relación al molle, esto se puede comprobar en la Figura 54 elaborado a partir del error estándar de los porcentajes de azufre de los tipos de biomasa de estudio.

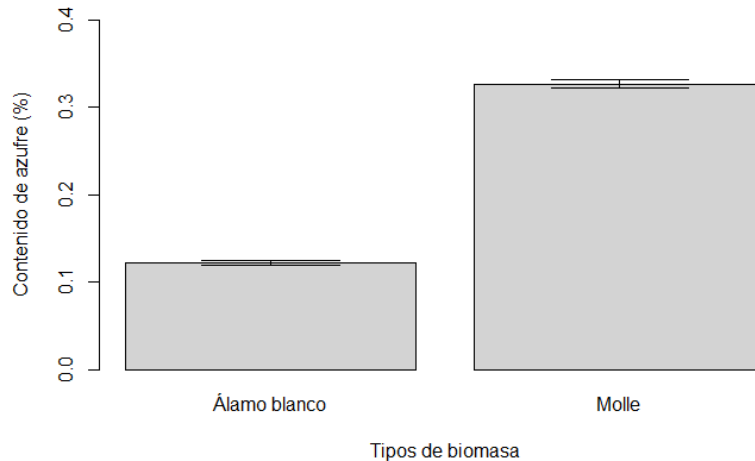


Figura 54: Error estándar (EE) de los porcentajes de azufre de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En el estudio realizado por Castro (2018) con biomasa de pino tiene un porcentaje del 0.24 % en el contenido de azufre, este valor manifiesta que los porcentajes obtenidos de 0.12 % en álamo blanco y 0.32 % en la especie de molle se encuentran en rangos similares, también indica que las especies con un bajo porcentaje de biocarbón presentan un índice menor de contaminación en el proceso de transformación de biomasa a biocarbón. Al-Kassir (2013) tiene un valor promedio de 0.005 % en biomasa de eucalipto, también señala que una de las características que la biomasa debe tener para que sea viable su uso en la transformación de un nuevo producto es una baja concentración de azufre en su composición elemental.

Por su parte, Urien (2013) manifiesta que el usufructo de la biomasa es un beneficio y oportunidad para obtener un nuevo tipo de tecnología limpia, gracias al mínimo porcentaje de azufre y nitrógeno que posee, a la vez esto ocasiona que según la técnica transformación o producto que se desee obtener se genere una menor cantidad de emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

El porcentaje del contenido de azufre es bajo lo cual es beneficioso, debido a que disminuye la emanación de gases y cuando se presenta el proceso de oxidación se transforma en dióxido de azufre, esto genera impactos negativos en el ambiente (B. García et al., 2016).

4.2 Caracterización física y análisis estadístico de la biomasa

La caracterización física de los residuos lignocelulósicos procedentes de la biomasa residual de la poda de árboles, se llevó a cabo mediante el análisis termogravimétrico de las variables físicas: humedad, contenido volátil, cenizas y carbono fijo, en este análisis se realizaron tres repeticiones por cada variable física. En la Tabla 31 y 32 se dan a conocer

los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico realizado con la biomasa residual de álamo blanco y molle.

Tabla 31: Resultados del análisis termogravimétrico de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje

Variable física	Repeticiones		
	I	II	III
Humedad	48.814	53.300	54.615
Contenido volátil	45.980	41.780	40.030
Cenizas	1.550	1.750	1.610
Carbono fijo	3.660	3.170	3.450

Tabla 32: Resultados del análisis termogravimétrico de la biomasa residual de molle en porcentaje

Variable física	Repeticiones		
	I	II	III
Humedad	56.610	56.750	58.812
Contenido volátil	39.320	38.710	37.300
Cenizas	1.820	1.740	1.940
Carbono fijo	2.100	2.030	1.950

En la Tabla 33 y 34 se visualiza los resultados obtenidos en los indicadores descriptivos, que se desarrollaron en base a los valores obtenidos del análisis termogravimétrico aplicado a las dos especies de biomasa, para lo cual se estableció medidas de tendencia central y dispersión de datos, como la media y mediana, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE).

Tabla 33: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización física de la biomasa de álamo blanco

Variable física	Media	Mediana	DE	CV	EE
Humedad	52.240	53.300	3.042	5.823	1.756
Contenido volátil	42.597	41.780	3.058	7.179	1.777
Cenizas	1.636	1.610	0.102	6.270	0.059
Carbono fijo	3.426	3.450	0.245	7.174	0.141

Tabla 34: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización física de la biomasa de molle

Variable física	Media	Mediana	DE	CV	EE
Humedad	57.360	56.750	1.261	2.198	0.728
Contenido volátil	38.443	38.710	1.036	2.695	0.598
Cenizas	1.833	1.820	0.100	5.490	0.058
Carbono fijo	2.026	2.030	0.075	3.703	0.043

A continuación, se realizó una evaluación individual de cada variable física para analizar y comparar los resultados referentes al contenido termogravimétrico de la biomasa residual de álamo blanco y molle.

4.2.1 Humedad.

En la Tabla 35 se exponen los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al contenido de humedad presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle. Se obtuvo un valor bajo de humedad debido a que anteriormente se realizó un proceso de secado, según la recomendación de Sun et al. (2017) se puede aplicar el método de beneficio seco, el cual consistió en secar las muestras en una estufa a 105 °C por 12 horas hasta obtener un porcentaje menor. Castro (2018) manifiesta que es factible que el contenido de humedad presente en las muestras de materia prima para la producción de biocarbón no sea mayor al 10 %.

Tabla 35: Porcentajes del contenido de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	7.304	7.340	7.530
Molle	8.970	8.850	8.880

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 55) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de humedad que posee la biomasa residual de estudio.

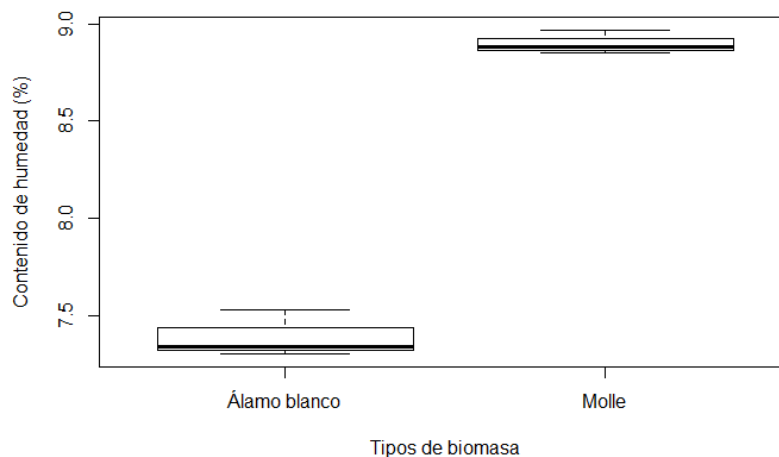


Figura 55: Box-plot de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 36 se muestran los valores obtenidos en los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los resultados del contenido de humedad de las dos especies de biomasa.

Tabla 36: Análisis descriptivo de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	7.391	7.340	0.120	1.642	0.070
Molle	8.900	8.888	0.062	0.702	0.036

De acuerdo, con el análisis descriptivo realizado la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 7.33 %, con un error estándar (EE) de 0.003 % que se expresa en un intervalo de [7.327 %, 7.333 %], a diferencia de la especie de molle que posee una media aritmética de 8.90 % con un error estándar (EE) de 0.036 % que corresponde a un intervalo de [8.864 %, 8.936 %], obteniendo así que la especie de álamo blanco presenta una menor variabilidad y bajo contenido de humedad, esto se puede comprobar en la Figura 56, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.

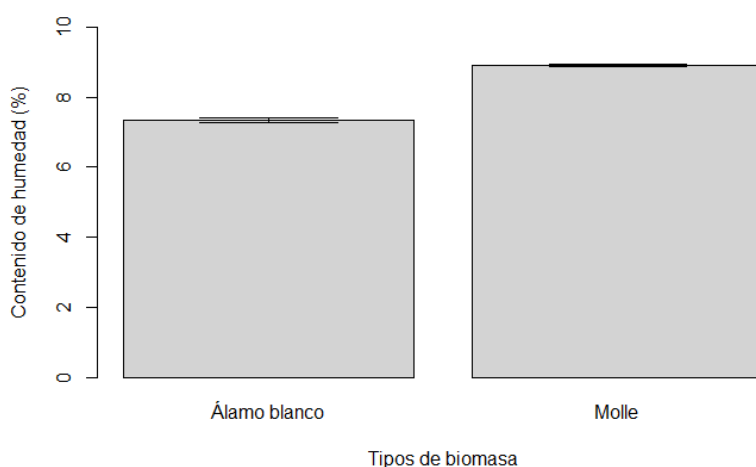


Figura 56: Error estándar (EE) de los porcentajes de humedad de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Castro (2018) explica que la biomasa sufre cambios al someterse a diferenciaciones térmicas como es el proceso de pirólisis, se van perdiendo moléculas de agua y se presenta un proceso de secado mayor hasta los 100 °C, por ello se obtiene un menor porcentaje de humedad antes de aplicar el método de torrefacción para la producción de biocarbón, debido a que este parámetro influye de forma directa en el proceso de torrefacción, si la biomasa tiene un alto valor de humedad, la energía y calor que se genere durante el proceso de torrefacción servirán para secar la biomasa antes de continuar con el proceso de torrefacción a 300 °C, esto podría presentar alteraciones en la formación del producto.

. El autor Castro (2018) obtiene un porcentaje del 6.59 % en el contenido de humedad en la especie de pino, por lo cual se puede determinar que los resultados obtenidos se

encuentran en rangos similares respecto al resultado conseguido del 7.39 % en la biomasa de álamo blanco, igualmente el estudio realizado por Martínez (2015) da a conocer que la humedad presente en las muestras de biomasa de álamo es de 7 %, expresando así la similitud de los porcentajes, también indica que en los primeros 100 °C de temperatura se va a presentar una pérdida de humedad más intensa por la condensación de las partículas de agua que posee la biomasa residual de las especies de estudio.

4.2.2 Contenido volátil.

En la Tabla 37 se exponen los resultados del análisis termogravimétrico con respecto al contenido volátil que se obtiene durante el proceso de análisis en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 37: Porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	45.980	41.780	40.030
Molle	39.320	38.710	37.300

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 57) se visualiza la distribución de los datos y el contenido volátil que posee la biomasa residual de estudio.

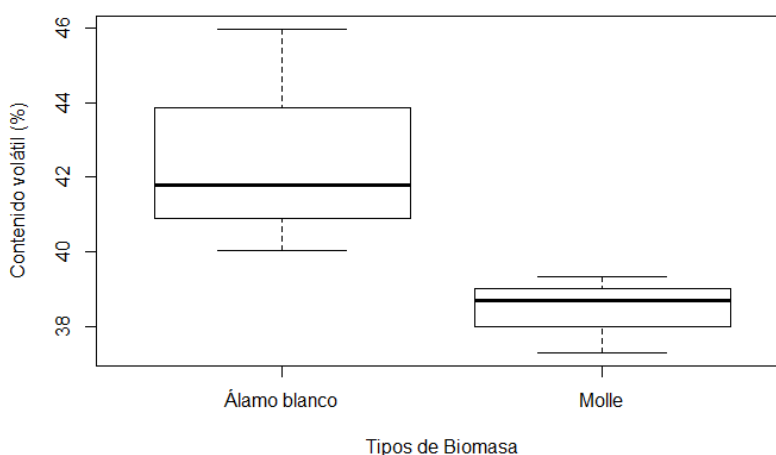


Figura 57: Box-plot de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 38 se dan a conocer los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido volátil de las especies de biomasa residual de estudio.

Tabla 38: Análisis descriptivo de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	42.597	41.780	3.058	7.179	1.777
Molle	38.443	38.710	1.036	2.695	0.598

El contenido volátil, en la especie arbórea de álamo blanco posee un valor promedio de 42.59 % con un error estándar (EE) de 1.77 %, que corresponde a un intervalo de [40.82 %, 44.36 %], por lo contrario en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 38.44 % con un error estándar (EE) de 0.59 % que resulta en un intervalo de [37.85 %, 39.03 %], se asume que la especie de molle presenta menor variabilidad en la experimentación y un bajo contenido volátil, de esta manera manifestando un menor riesgo de contaminación por emisiones que se originan en el proceso de pirolización. Esto se puede comprobar en la Figura 58, donde se elaboró una gráfica a partir del error estándar que presentan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.



Figura 58: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido volátil de la biomasa residual de álamo blanco y molle

4.2.3 Cenizas.

En la Tabla 39 se exponen los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al contenido de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle.

Tabla 39: Porcentajes del contenido de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	1.550	1.750	1.610
Molle	1.820	1.740	1.940

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 59) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de cenizas que posee la biomasa residual de estudio.

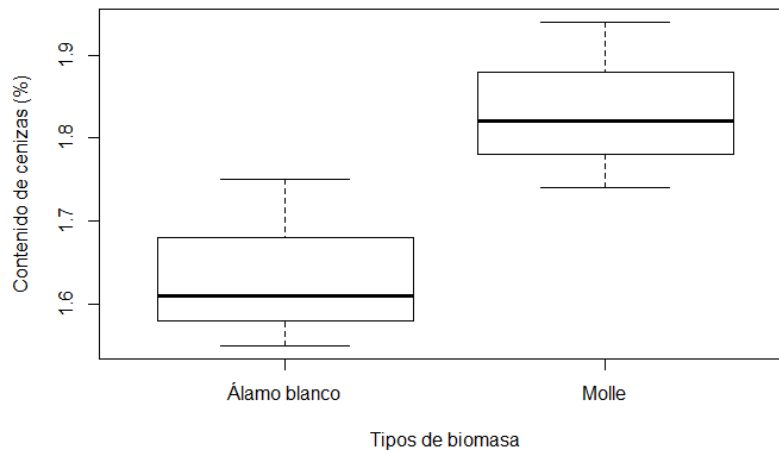


Figura 59: Box-plot del contenido de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 40 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido de cenizas de las especies de biomasa residual de estudio.

Tabla 40: Análisis descriptivo de los porcentajes de ceniza de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	1.636	1.610	0.102	6.270	0.059
Molle	1.833	1.820	0.100	5.490	0.058

En el contenido de cenizas la biomasa de álamo blanco tiene un valor promedio de 1.636 % con un error estándar (EE) de 0.059 %, que corresponde a un intervalo de [1.577 %, 1.695 %], por lo contrario en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 1.833 % con un error estándar (EE) de 0.058 % que resulta en un intervalo de [1.775 %, 1.891 %], por lo cual se aprecia que la especie de molle presenta menor variabilidad en la experimentación y resultó con un porcentaje de cenizas ligeramente más alto con relación a la especie de álamo blanco, esto se puede comprobar en la Figura 60, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar de los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio

Bermeo (2018) tiene un valor de 1.13 % de ceniza en la caracterización física en biomasa de balsa, de igual forma el estudio de Manals et al. (2011) realizado con residuos de pino tiene un valor de 2.3 %, comprobando así la similitud con los promedios obtenidos en el álamo blanco de 1.61 % y 1.83 % en la biomasa de molle.

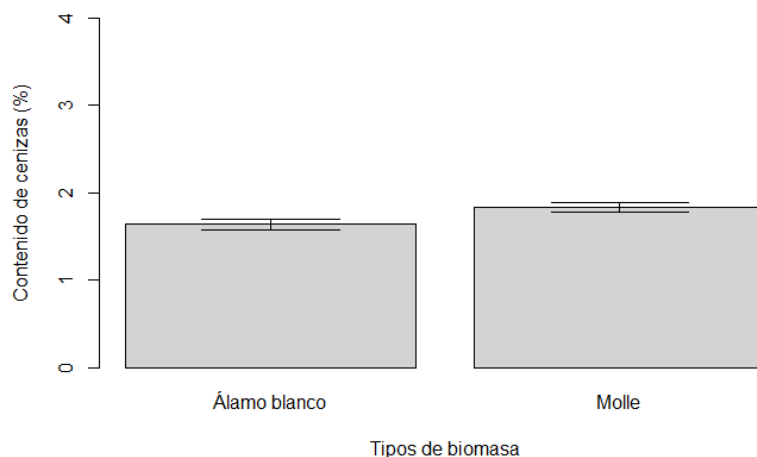


Figura 60: Error estándar (EE) de los porcentajes de cenizas de la biomasa residual de álamo blanco y molle

4.2.4 Carbono fijo.

Los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al porcentaje de carbono fijo de la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle, se exponen en la Tabla 41.

Tabla 41: Contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle en porcentaje

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	3.660	3.170	3.450
Molle	2.100	2.030	1.950

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 61) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de carbono fijo que posee la biomasa residual de estudio.

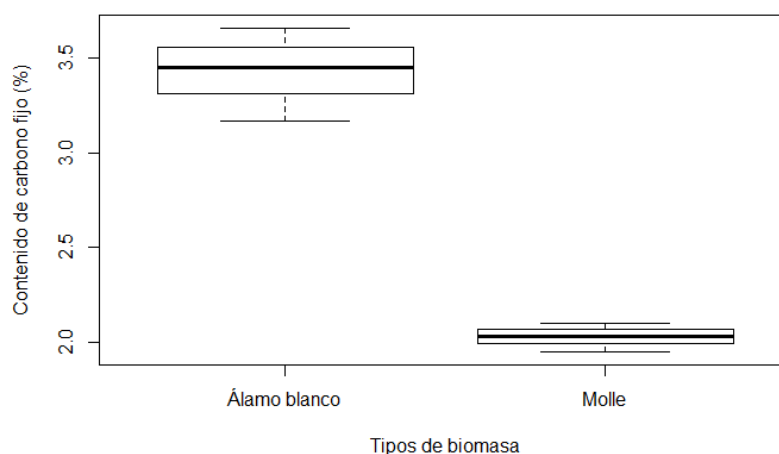


Figura 61: Box-plot de los porcentajes de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 42 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido de carbono fijo de las especies de biomasa residual de estudio.

Tabla 42: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	3.426	3.450	0.245	7.174	0.141
Molle	2.026	2.030	0.075	3.703	0.043

El carbono fijo en la biomasa residual de álamo blanco posee un valor promedio de 3.426 % con un error estándar (EE) de 0.141 %, que corresponde a un intervalo de [3.285 %, 3.567 %], en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 2.026 % con un error estándar (EE) de 0.043 % que resulta en un intervalo de [1.983 %, 2.069 %], por lo tanto se aprecia que la especie de molle presenta menor variabilidad en los datos obtenidos en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 62, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.

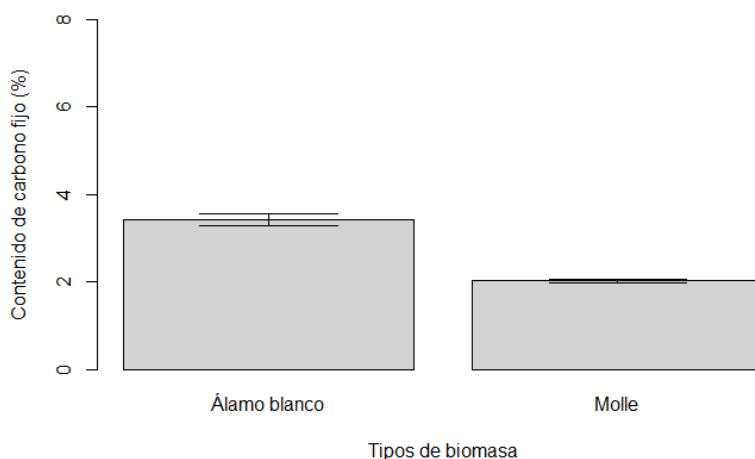


Figura 62: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle

Bermeo (2018) obtiene un porcentaje de 4.96 % de carbono fijo en la biomasa de aserrín de balsa, este porcentaje tiene similitud con el valor obtenido en la especie de álamo blanco de 3.44%.

4.3 Poder calórico de la biomasa residual

Se realizó el análisis de poder calórico superior (PCS) e inferior (PCI) como parte de la caracterización de la biomasa residual de estudio para conocer el contenido energético. En la Tabla 43 y 44 se exponen los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio

realizadas con las especies de: álamo blanco y molle, para este análisis se efectuaron tres repeticiones.

4.3.1 Poder calórico superior (PCS).

Los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico superior presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 43.

Tabla 43: Resultados del poder calórico superior aplicado a la biomasa residual de estudio en Cal/g

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	4350	4317	4334
Molle	4294	4277	4285

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 60) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de poder calórico superior que posee la biomasa residual de estudio.

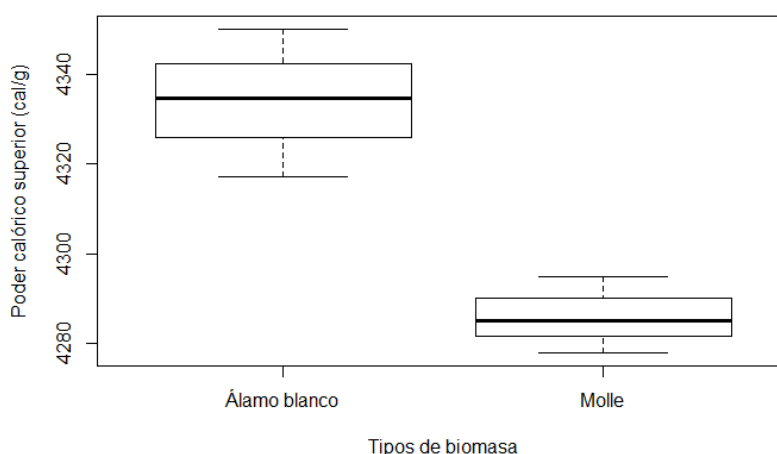


Figura 63: Box-plot del contenido de poder calórico superior de la biomasa residual de álamo blanco y molle en Cal / g

En la Tabla 44 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los resultados del contenido de poder calórico superior de las dos especies de biomasa, donde se describen las medidas de tendencia central, como la media y mediana y dispersión de datos: desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE).

Tabla 44: Análisis descriptivo de los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico superior en Cal/g

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	4333.96	4334.60	16.55	0.382	9.56
Molle	4285.93	4285.00	8.53	0.199	4.93

El poder calórico en la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 4333.96 Cal/g con un error estándar (EE) de 9.56 Cal/g, que resulta en un intervalo estimado de [4324.4 Cal/g, 4343.52 Cal/g], mientras que la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 4285.93 Cal/g con un error estándar (EE) de 4.93 Cal/g, que corresponde a un intervalo de [4281 Cal/g, 4290.86 Cal/g], obteniendo de esta manera un mayor contenido calórico en la especie de álamo blanco y en la especie de molle se presenta una menor variabilidad de los resultados en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 64, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de poder calórico superior en cada uno de los sustratos de estudio.

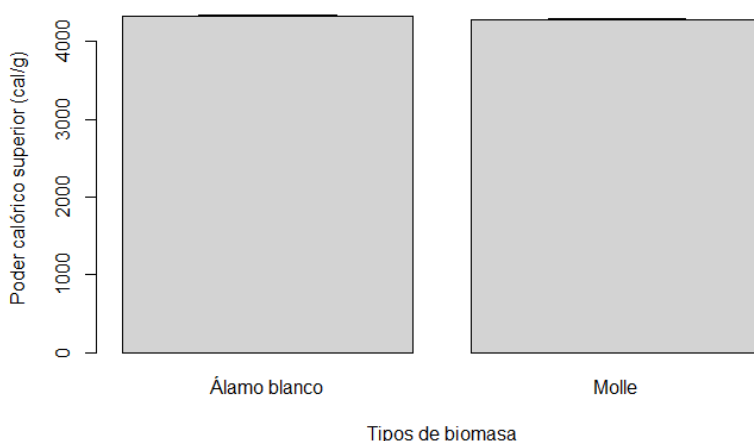


Figura 64: Error estándar (EE) del poder calórico superior de la biomasa residual de álamo blanco y molle Cal/g

Los resultados obtenidos en las especies de álamo blanco y molle de 4333 cal/gr y 4285 Cal/g, respectivamente, se pueden comprobar con el valor alcanzado por Carmona (2015) donde obtiene 4462 Cal/g en el contenido de poder calórico superior en biomasa de eucalipto. Por su parte, Pérez (2016) consigue un valor de 4401 cal/g en biomasa de álamo y en platanero una cantidad de 4312 cal/g.

4.3.2 Poder calórico inferior (PCI).

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de poder calórico inferior presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 45.

Tabla 45: Resultados del poder calórico inferior aplicado a la biomasa residual de estudio en Cal/g

Tipos de biomasa	Repeticiones		
	I	II	III
Álamo blanco	2078	2062	2051
Molle	1402	1377	1398

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 65) se puede visualizar la distribución de los datos y comparar el contenido de poder calórico inferior que posee la biomasa residual de álamo blanco y molle.

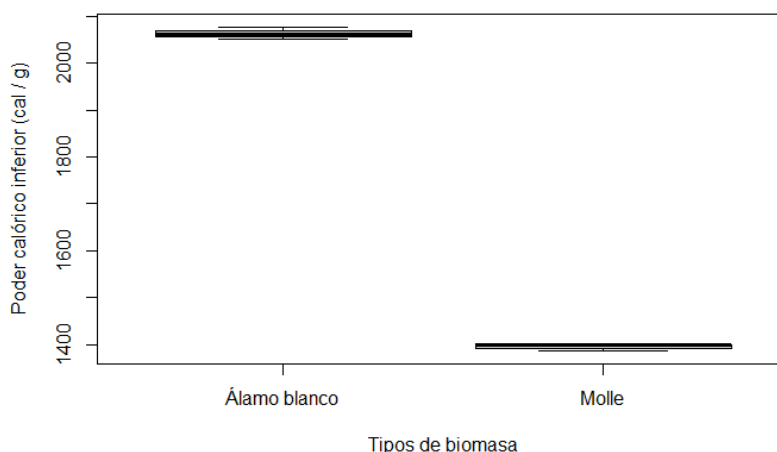


Figura 65: Box-plot del contenido de poder calórico inferior de la biomasa residual de álamo blanco y molle

En la Tabla 46 se visualiza los resultados de los indicadores descriptivos del análisis de poder calórico inferior, que se desarrollaron en base a los valores conseguidos en las pruebas de laboratorio, donde se describen las medidas de tendencia central y dispersión de datos.

Tabla 46: Análisis descriptivo de los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico inferior en Cal /g

Tipos de biomasa	Media	Mediana	DE	CV	EE
Álamo blanco	2063.66	2062.00	13.57	0.65	7.83
Molle	1395.66	1398.00	7.76	0.55	4.48

El poder calórico inferior en la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 2063 Cal/gr con un error estándar (EE) de 7.8 Cal/g, que resulta en un intervalo estimado de [2055.2 Cal/g, 2070.8 Cal/g], mientras que la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 1395.6 Cal/gr con un error estándar (EE) de 4.48 Cal/g, que corresponde a un intervalo de [1391.12 Cal/g, 1400.08 Cal/g], obteniendo de esta manera un mayor contenido calórico en la especie de álamo blanco y en la especie de molle se presenta una menor variabilidad de los resultados en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 66, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de carbono de cada uno de los tipos de biomasa de estudio. Al-Kassir (2013) alcanzó una cantidad de contenido calórico de 2747.66 Cal/g en el biocarbón realizado con biomasa de orujo de uva, valor que presenta similitud con los resultados obtenidos de la biomasa de estudio.



Figura 66: Error estándar (EE) del poder calórico inferior en la biomasa residual de álamo blanco y molle

4.4 Relación Carbono – Nitrógeno (C / N) de la biomasa

Previo a la elaboración del biocarbón, se procedió a evaluar el contenido de los parámetros de carbono y nitrógeno, con la finalidad de analizar la relación Carbono / Nitrógeno (C / N) de las especies de estudio (molle y álamo blanco), estos elementos son indispensables para el desarrollo del ciclo natural ya que influyen directa e indirectamente en todos los procesos biológicos. A continuación, en la Tabla 47 se expone los resultados obtenidos en la relación C / N de las especies de estudio.

Tabla 47: Resultados del análisis de la relación C / N en porcentaje

Tipos de biomasa	Variable Química	Valor	Relación C / N
Álamo blanco	Carbono	44.6950	42.90
Álamo blanco	Nitrógeno	1.0422	
Molle	Carbono	44.2307	57.44
Molle	Nitrógeno	0.7766	

La biomasa de molle presenta un promedio de 42.90 % y la especie de álamo blanco tiene un porcentaje del 57.44 % en la relación C / N, por su parte Castro (2018) obtiene un porcentaje del 45.69 % con biomasa de pino, valor que presenta similitud con los porcentajes obtenidos en las pruebas de laboratorio. Del mismo modo, Sun et al. (2017) en su investigación obtienen un porcentaje del 40.89 % y 52.01 % en residuos de podas, también explican que la relación C / N con un porcentaje mayor a 30 % contribuye a la disminución de las emisiones de N₂O en el suelo, por esta razón y conjuntamente con el análisis de los resultados alcanzados en la caracterización física y química de los tratamientos de estudio (álamo blanco y molle) se determinó que las especies son viables

para la producción de biocarbón, por ello, es importante tener un valor alto en el contenido de carbono y bajo nivel de nitrógeno en la caracterización de la biomasa para alcanzar un valor mayor en la relación. No obstante, el autor Parra (2016), en su trabajo de investigación hace referencia que un contenido de carbono mayor al 40% en la biomasa es factible para la producción de biocarbón y viable para la experimentación, dado que si aumenta el contenido de carbono y disminuye el nivel de nitrógeno se puede alcanzar porcentajes altos en la relación, el incremento o disminución del porcentaje del contenido de carbono puede variar dependiendo de la composición o estructura de la especie arbórea (lignina, celulosa y hemicelulosa).

4.5 Producción de biocarbón

En la caracterización de la biomasa las especies de estudio presentaron un porcentaje alto de humedad, Manals et al. (2011) y Sun et al. (2017) menciona que el porcentaje de humedad debe ser inferior al 10 % para continuar con el proceso de producción de biocarbón, caso contrario recomienda aplicar el método de beneficio seco hasta que se cumpla este parámetro, por ello anteriormente a la elaboración del biocarbón la biomasa fue secada en el horno a 105 °C hasta obtener un porcentaje menor.

En la obtención de los dos tipos de biocarbón se consideraron parámetros como el tiempo y la temperatura, en base a esto la temperatura de torrefacción aplicada fue de 300 °C y el tiempo de duración del proceso para cumplir con el método de torrefacción fue de dos horas y media. En la Tabla 48 se exponen los resultados obtenidos durante la elaboración de biocarbón con los dos tipos de sustratos (álamo blanco y molle), así como el peso de la masa inicial (muestra no torrefactada en base seca) que ingresa al termogravimétrico y el peso que se obtiene después del proceso de torrefacción (muestra torrefactada), para posteriormente identificar el rendimiento másico, de acuerdo a la metodología aplicada por (Guerra, 2015).

Tabla 48: Producción del biocarbón a partir de la biomasa de álamo blanco y molle en (g)

Código Laboratorio	Tipos de biomasa	Tipo de residuo	Masa inicial	Biocarbón obtenido	Rendimiento másico (%)
T3UBE_0052	Álamo blanco	Ramas Podadas	873.02	402.3	46.08
T3UBE_0053	Molle	Ramas Podadas	821.06	367.7	44.78

Para la elaboración del biocarbón se colocó una masa inicial de la especie de álamo blanco de 873.02 g y el biocarbón obtenido total después del proceso de torrefacción fue de 402.3 g, donde se puede deducir que después del proceso de torrefacción la biomasa ha perdido un total de 477 g, consiguiendo así un rendimiento másico del 46.08 %. A

diferencia, en la biomasa del molle que tiene una masa inicial de 821.06 g y un total del biocarbón obtenido es de 367 g, existiendo de esta manera una pérdida de masa de 367.7 g, alcanzando un rendimiento másico del 44.78 %. Estos resultados obtenidos del rendimiento másico presentan similitud con Bermeo (2018) que aplica el método de torrefacción a 300 °C utilizando aserrín de balsa, de esta forma alcanzando un rendimiento másico del 42.06 %.

La pérdida de peso entre la biomasa con referencia al biocarbón obtenido puede presentarse por la etapa inicial, en donde se pierde humedad con el aumento de la temperatura y por los cambios obtenidos mediante la descomposición térmica de la misma, de igual forma los porcentajes pueden variar dependiendo de la estructura de cada especie, Bermeo (2018) indica que la temperatura influye directamente sobre el aumento o disminución de la composición de la biomasa.

En la Figura 67 se observa el antes y después de la biomasa transformada en biocarbón por el método de torrefacción. Las imágenes a y c, hacen referencia a las limaduras de los residuos de biomasa de las especies de álamo blanco(a) y molle(c), respectivamente obtenidos de las podas de ramas y las ilustraciones b y d hacen referencia al biocarbón obtenido después del proceso de torrefacción y triturado. Como se puede determinar la biomasa cambió de color marrón a negro mediante el proceso de torrefacción, debido al cambio en la composición por el incremento de la temperatura.

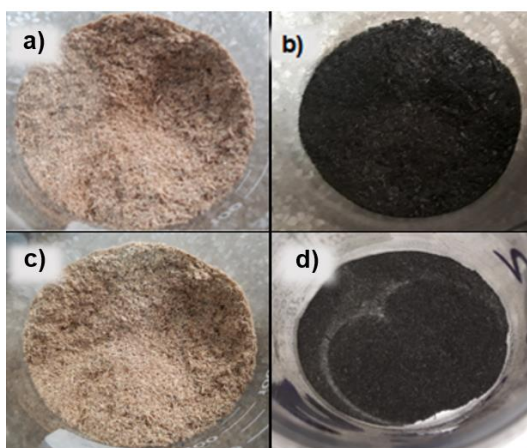


Figura 67: Limaduras de biomasa y biocarbón de la especie de molle y álamo blanco

El biocarbón de álamo blanco y molle poseen un pH alcalino de 7.5 y 8.2, respectivamente, de igual forma el autor (Alcañiz, 2013) posee un pH de 8 en la biomasa de astilla de chopo, el pH del biochar es dependiente del tipo de materia prima empleada, de su composición y de las condiciones de pirolisis (Trujillo, 2017). La Figura 68 visualiza un gráfico que se obtuvo del software del equipo TGA, la misma que señala la influencia

que tiene la temperatura sobre el peso de la biomasa, las curvas TGA de la gráfica expresan la cantidad y velocidad de la degradación de la biomasa acorde el incremento de la temperatura de una muestra en función a la temperatura y el tiempo en una atmósfera controlada en la elaboración del biocarbón (M. Segura, 2019).

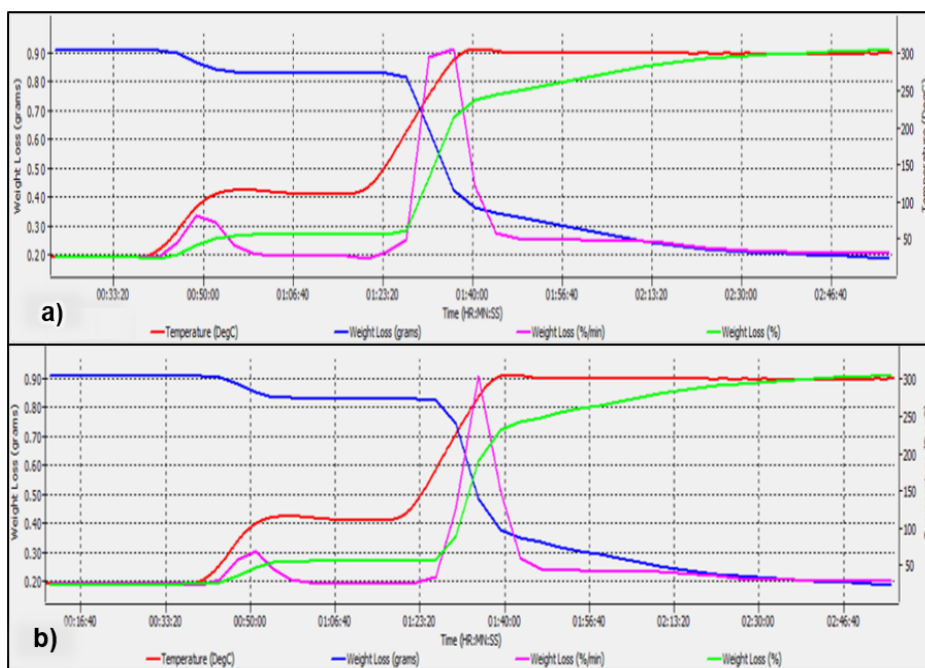


Figura 68: Variación de las curvas termogravimétricas durante el análisis TGA del (a) biocarbón de álamo blanco y (b) biocarbón de molle

Se observa que la biomasa pierde peso (línea azul) conforme aumenta la temperatura (línea roja), según Arteaga-Crespo et al. (2012) durante la desintegración térmica de las muestras arbóreas de estudio, da a conocer dos fases de distinción, donde se puede relacionar que posiblemente el pico obtenido en la zona de temperatura alta sea la descomposición de la celulosa y si se obtiene un pico en la zona de temperatura baja se trate de la desintegración de la hemicelulosa. De igual manera se visualiza en la Figura 65, que el análisis termogravimétrico aplicado para la especie de álamo blanco señala una pérdida primordial de masa entre 250 °C y 300 °C, por lo contrario, la especie de molle pierde una cantidad considerable de peso entre los 200 °C y 300 °C.

4.6 Caracterización química y análisis estadístico del biocarbón.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental realizado con los tratamientos de biocarbón de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 49 y 50, donde se presenta el contenido de carbono total, hidrógeno total, oxígeno, nitrógeno y azufre. En este análisis se efectuaron tres repeticiones por cada variable química.

Tabla 49: Resultados del análisis elemental aplicado al biocarbón de la biomasa residual de álamo blanco en porcentaje

Variable química	Repeticiones		
	I	II	III
Carbono	60.9070	61.1540	60.9380
Hidrogeno	3.1596	3.1672	3.1625
Oxígeno	0.0027	0.0025	0.0039
Nitrógeno	1.9942	2.0141	1.9928
Azufre	0.0338	0.0362	0.0319

Tabla 50: Resultados del análisis elemental aplicado al biocarbón de la biomasa residual de molle en porcentaje

Variable química	Repeticiones		
	I	II	III
Carbono	56.1150	56.5250	56.3500
Hidrogeno	3.3970	3.5878	3.5852
Oxígeno	0.0055	0.0050	0.0066
Nitrógeno	1.6165	1.7192	1.6915
Azufre	0.0221	0.0203	0.0218

En la Tabla 51 y 52 se visualiza los resultados adquiridos en los indicadores descriptivos, que se desarrollaron en base a los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio de los tratamientos, donde se describen las medidas de tendencia central: media y mediana, y dispersión de datos: desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE).

Tabla 51: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química del biocarbón de álamo blanco

Variable química	Media	Mediana	DE	CV	EE
Carbono	60.999	60.938	0.134	0.220	0.077
Hidrogeno	3.163	3.162	0.003	0.121	0.002
Oxígeno	0.003	0.002	0.0008	2.582	0.0005
Nitrógeno	2.000	1.994	0.011	0.595	0.006
Azufre	0.034	0.033	0.002	6.322	0.001

Tabla 52: Análisis descriptivo de los porcentajes obtenidos en la caracterización química del biocarbón de molle

Variable Química	Media	Mediana	DE	CV	EE
Carbono	56.330	56.350	0.205	0.365	0.118
Hidrogeno	3.523	3.585	0.109	3.105	0.063
Oxígeno	0.005	0.005	0.0008	1.476	0.0007
Nitrógeno	1.675	1.691	0.053	3.170	0.030
Azufre	0.021	0.021	0.0009	4.318	0.0005

A continuación, se realizó una evaluación individual de cada variable química para analizar y comparar los resultados obtenidos en el contenido elemental de los tratamientos de biocarbón de álamo blanco y molle.

4.6.1 Carbono total.

En la Tabla 53 se exponen los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de carbono total del biocarbón que se obtuvo de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 53: Porcentajes del contenido de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	60.907	61.154	60.938
Biocarbón de molle	56.115	56.525	56.350

En el gráfico de caja o box-plot (Figura 69) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de carbono total que posee el biocarbón de álamo blanco y molle.

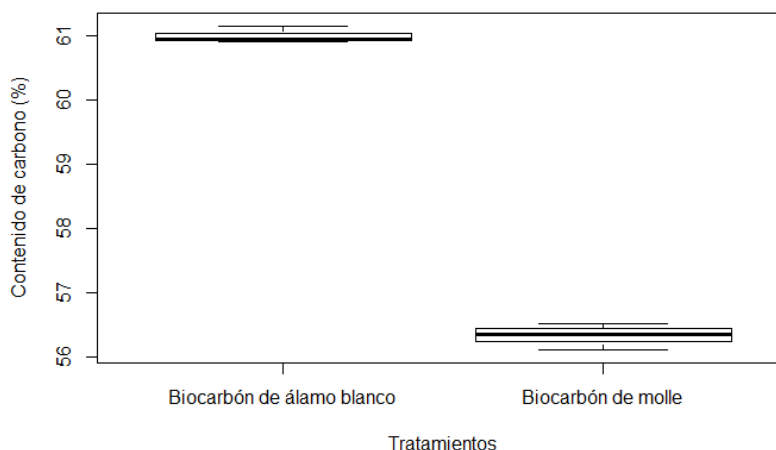


Figura 69: Box-plot de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 54 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, los cuales se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de carbono del biocarbón de estudio.

Tabla 54: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	60.999	60.938	0.134	0.220	0.077
Biocarbón de molle	56.330	56.350	0.205	0.365	0.118

El biocarbón obtenido a partir del álamo blanco posee un valor promedio de 60.99 % con un error estándar (EE) de 0.077 %, que resulta en un intervalo estimado de [60.91 %, 61.067 %], mientras que en el biocarbón de molle se tiene un valor promedio de 56.33 % con un error estándar (EE) de 0.118 %, que corresponde a un intervalo de [56.21 %, 56.44 %]. Por lo tanto, se puede asumir que el biocarbón de álamo blanco presenta menor variabilidad en la experimentación, y en efecto tiene un mayor contenido de carbono en comparación con la especie de molle, esto se puede comprobar en la Figura 70, para lo cual se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar para corroborar los resultados obtenidos.

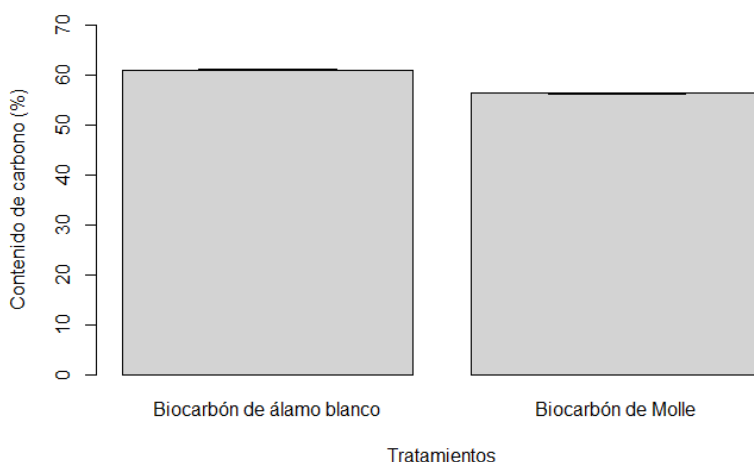


Figura 70: Error estándar (EE) de los porcentajes de carbono total del biocarbón de álamo blanco y molle

En la investigación realizada por Castro (2018) se obtuvo un porcentaje del 63.15 % en el biocarbón obtenido a partir de pino, valor que tiene una relación con el promedio alcanzado de 60.93 % en el tratamiento de álamo blanco. Por lo contrario, en la especie de molle se alcanzó un porcentaje del 56.33 %, este resultado presentó similitud con el porcentaje del 55.40 % que manifestó Delvasto & Pardavé (2017) en su publicación. Esto se debe a que la estructura o composición de cada especie arbórea es diferente y algunas especies tienden a tener una cantidad baja de minerales que otras, por lo que puede aumentar el contenido de carbono (Martínez, 2015).

Takolpuckdee (2014) señala que el biocarbón posee un mayor contenido de carbono con relación a la biomasa de estudio, debido a que el 50 % total de carbono de la biomasa inicial es almacenada en el proceso de pirólisis y entre 20 %– 50 % se calcina, esto hace posible almacenar y fijar el carbono a largo plazo para que no se transforme en dióxido de carbono, aumentando su contenido durante la transformación.

Por su parte, los autores Ferro & Soler (2009) indican que la temperatura de torrefacción influye de forma directa sobre el nivel de composición de la biomasa, debido a que la

pérdida de los elementos de oxígeno e hidrógeno se origina por la transformación de los mismo obteniendo agua, CO y CO₂ durante el proceso de torrefacción, incrementa el contenido de carbono y disminuye el contenido de hidrógeno y oxígeno.

4.6.2 Hidrógeno total.

En la Tabla 55 se exponen los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de hidrógeno total presente en la biocarbón de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 55: Porcentajes del contenido de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	3.159	3.167	3.162
Biocarbón de molle	3.397	3.587	3.585

En el gráfico de caja (Figura 71) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de hidrógeno total que posee el biocarbón de álamo blanco y molle.

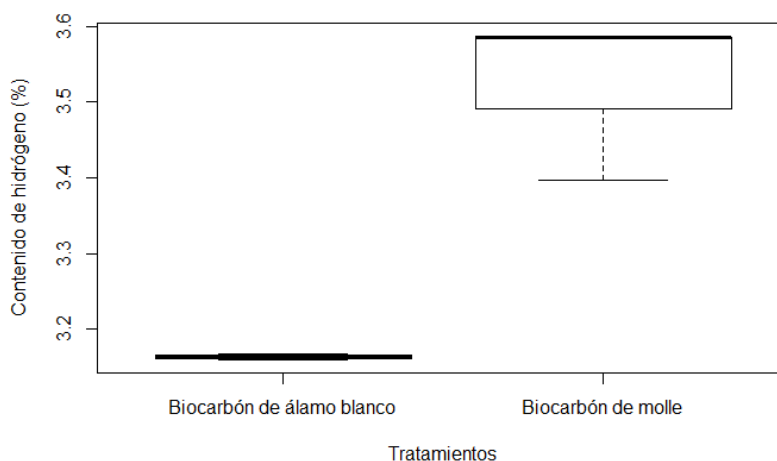


Figura 71: Box-plot de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 56 se muestran los valores obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de hidrógeno total de los dos tipos de biocarbón de estudio.

Tabla 56: Análisis descriptivo de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	3.163	3.162	0.003	0.121	0.002
Biocarbón de molle	3.523	3.585	0.109	3.105	0.063

Acorde, con los resultados obtenidos en el contenido de hidrógeno de la especie de álamo blanco presenta un valor promedio de 3.16 % con un error estándar (EE) de 0.002 %, que resulta en un intervalo de [3.158 %, 3.162 %]. y la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 3.52 % con un error estándar (EE) de 0.0632 %, que corresponde a un intervalo de [3.456 %, 3.583 %], al comparar las dos especies de estudio se asume que el biocarbón de álamo blanco presenta menor variabilidad y bajo contenido de hidrógeno, esto se puede comprobar en la Figura 72, donde se realizó una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de hidrógeno de cada uno de los tratamientos de estudio.

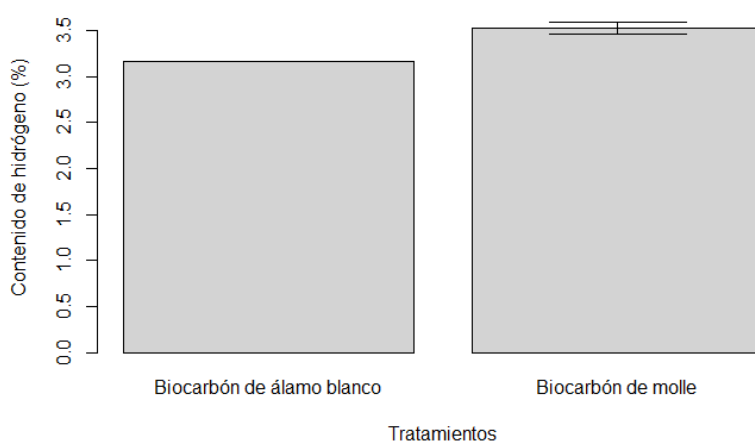


Figura 72: Error estándar (EE) de los porcentajes de hidrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

Urien (2013) obtuvo 3.30 % de hidrógeno en el biocarbón producido con biomasa leñosa, de igual manera Delvasto & Pardavé (2017) adquieren un porcentaje del 3.58 % en el biocarbón realizado con podas de jardín conformadas por ramas y troncos de árboles, obteniendo así una similitud del contenido de hidrógeno presente con el biocarbón de álamo blanco y molle. Por otra parte, Parra (2016) indica que la pérdida de hidrógeno durante la transformación de la biomasa a biocarbón se puede dar por la formación de agua, monóxido y dióxido de carbono durante el proceso de torrefacción.

4.6.3 Oxígeno.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de oxígeno presente en el biocarbón de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 57.

Tabla 57: Porcentajes del contenido de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	0.002	0.002	0.003
Biocarbón de molle	0.005	0.005	0.006

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 73) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de oxígeno que posee el biocarbón de álamo blanco y molle.

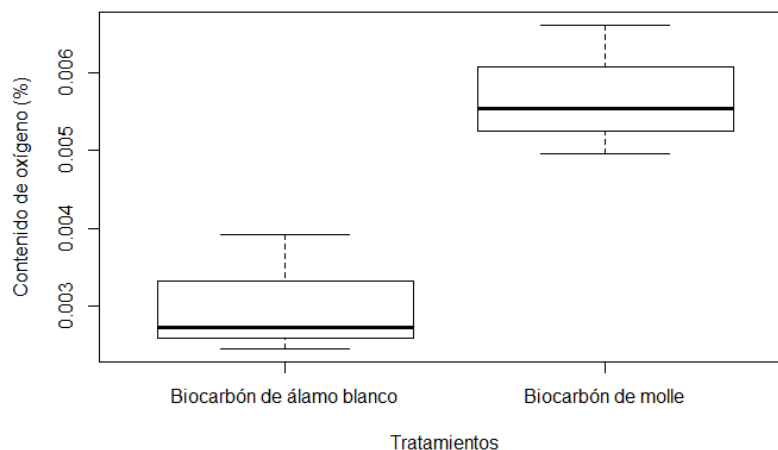


Figura 73: Box-plot de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 58 se muestran los valores obtenidos en los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de oxígeno de los dos tipos de biocarbón.

Tabla 58: Análisis descriptivo de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	0.003	0.002	0.0008	2.582	0.0005
Biocarbón de molle	0.005	0.005	0.0008	1.476	0.0005

La variable de oxígeno en el tratamiento de álamo blanco presenta una media aritmética de 0.003 % con un error estándar (EE) de 0.0005 %, que resulta en un intervalo estimado de [0.0025 %, 0.0035 %], mientras que el tratamiento de molle tiene un valor promedio de 0.005 % con un error estándar (EE) de 0.0005 % que corresponde a un intervalo de [0.0045 %, 0.0055 %], por lo cual se asume que los tratamientos de estudio presentan un bajo contenido de oxígeno y menor variabilidad en los resultados obtenidos en la experimentación, esto se puede comprobar con el gráfico de caja o boxplot (Figura 74) elaborado a partir del error estándar de los valores obtenidos en el contenido de oxígeno de los tratamientos de estudio.

La torrefacción es un pretratamiento termoquímico mediante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente por la ruptura de las moléculas de hemicelulosa, celulosa y en menor grado la lignina, la fracción volátil contiene ácidos carboxílicos, agua y gases permanentes (CO y CO_2), con la remoción de esta fracción orgánica se elimina gran parte del oxígeno de la biomasa, por lo tanto, presenta valores bajos (Arteaga, Segura, et al., 2015).

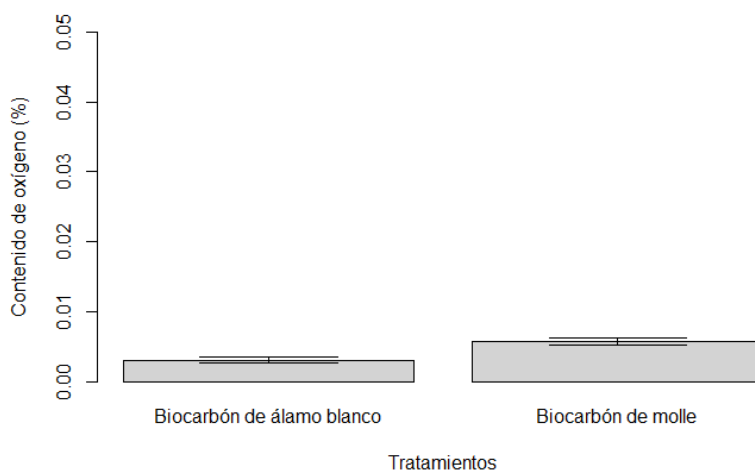


Figura 74: Error estándar (EE) de los porcentajes de oxígeno del biocarbón de álamo blanco y molle

4.6.4 Nitrógeno.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de nitrógeno presente en el biocarbón de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 59.

Tabla 59: Porcentajes del contenido de nitrógeno del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	1.994	2.014	1.992
Biocarbón de molle	1.616	1.719	1.691

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 75) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de nitrógeno que posee el biocarbón de álamo blanco y molle.

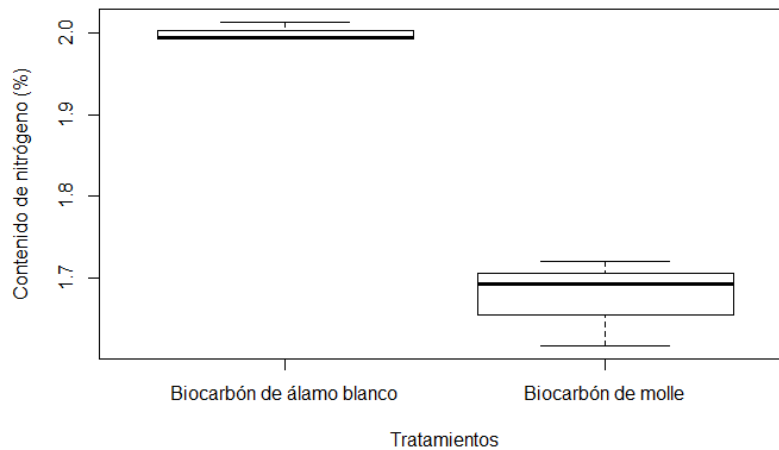


Figura 75: Box-plot de los porcentajes de nitrógeno del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 60 se muestran los valores obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de nitrógeno total de los dos tipos de biocarbón.

Tabla 60: Análisis descriptivo de los porcentajes de nitrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	2.000	1.994	0.011	0.595	0.006
Biocarbón de molle	1.675	1.691	0.053	3.170	0.030

El contenido de nitrógeno en el biocarbón de álamo blanco presenta un valor promedio de 2.0004 % con un error estándar (EE) de 0.0069 %, que resulta en un intervalo de [1.993 %, 2.007 %], mientras que la biomasa residual de molle tiene un porcentaje de 1.675 % con un error estándar (EE) de 0.0307 %, que corresponde a un intervalo de [1.645 %, 1.705 %]. Al comparar los dos tipos de biocarbón, se asume que el biocarbón de álamo blanco presenta menor variabilidad de los resultados obtenidos en la experimentación y un mayor contenido de nitrógeno, esto se puede comprobar en el boxplot (Figura 76) elaborado a partir del error estándar de los valores alcanzados en el contenido de oxígeno de los tratamientos de estudio.

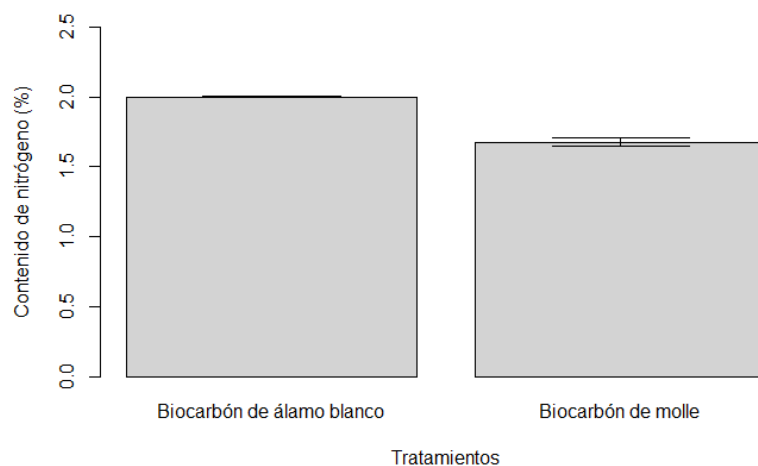


Figura 76: Error estándar (EE) de los porcentajes de nitrógeno total del biocarbón de álamo blanco y molle

Delvasto (2017) obtiene un porcentaje de 1.44 % en el biocarbón elaborado a partir de residuos de poda arbórea, igualmente estos valores tienen relación con el contenido de nitrógeno obtenido en el álamo blanco del 2 % y en el molle de 1.6 %, según McLaughlin et al. (2009) en su trabajo de investigación indican que el nitrógeno es sensible al incremento de temperatura, debido a esto el contenido es bajo en el biocarbón. Estudios actuales han dado a conocer que las muestras de biocarbón poseen un bajo contenido de nitrógeno, la pérdida de este componente con relación a la muestra original se genera por la transformación que tiene la biomasa en los procesos de carbonización de la materia prima en óxidos de nitrógeno o amoníaco (Domínguez et al., 2009).

Felipe et al (2000) indican que la deficiencia de este parámetro genera la acumulación de azúcares en los tejidos de las plantas, lo que genera una importante degradación de celulosa y lignina en la pared celular, dando lugar al endurecimiento de los tejidos de la planta y esto hace que la misma se torne quebradiza, también se da una reducción de la altura de la planta y las hojas empiezan amarillarse.

Chica & López (2018) manifiesta que el contenido de nitrógeno es importante para un mejor desarrollo vegetativo de las plántulas de girasol, debido a que es indispensable en el desarrollo de la raíz, tallo y hojas. Sin embargo, un nivel alto o exceso de nitrógeno puede ocasionar un desarrollo excesivo de la vegetación y retraso de la maduración.

El nitrógeno es un elemento primordial para las plantas y se encuentra como proteína en el ácido nucleico, pigmento de la clorofila, al igual que en otras partes de la estructura, no obstante en la corteza se encuentra en mayor cantidad (Carmona, 2015).

4.6.5 Azufre.

Los resultados obtenidos en el análisis elemental con respecto al contenido de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 61.

Tabla 61: Porcentajes del contenido de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	0.033	0.036	0.031
Biocarbón de molle	0.022	0.020	0.021

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 77) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de azufre que posee el biocarbón de álamo blanco y molle.

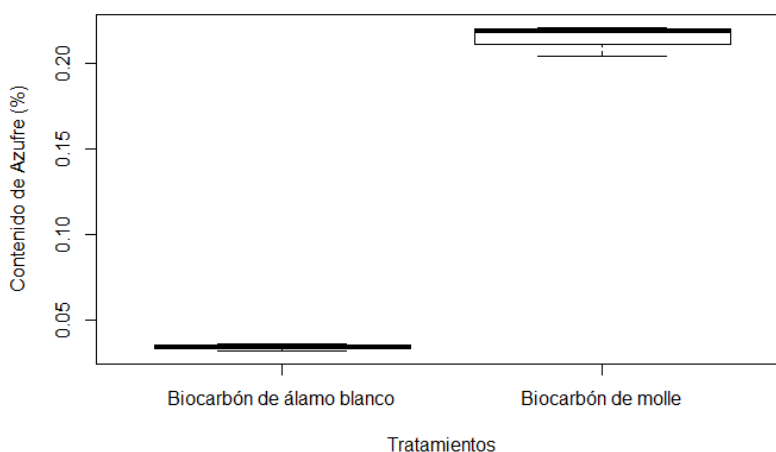


Figura 77: Box-plot de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 62 se muestran los valores obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los resultados registrados del contenido de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle.

Tabla 62: Análisis descriptivo de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	0.034	0.033	0.002	6.322	0.001
Biocarbón de molle	0.021	0.021	0.0009	4.318	0.0005

El porcentaje de azufre presente en el tratamiento de álamo blanco es de 0.034 % con un error estándar (EE) de 0.0012 %, que corresponde a un intervalo de [0.032 %, 0.035 %], por lo contrario el biocarbón obtenido a partir de la biomasa residual de molle alcanza un porcentaje del 0.021 % con un error estándar (EE) de 0.0005 % que resulta en un intervalo de [0.0205 %, 0.0215 %], por lo tanto se asume que la especie de álamo blanco presenta menor variabilidad en la experimentación y bajo contenido de azufre, esto se

puede comprobar en la Figura 78, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.

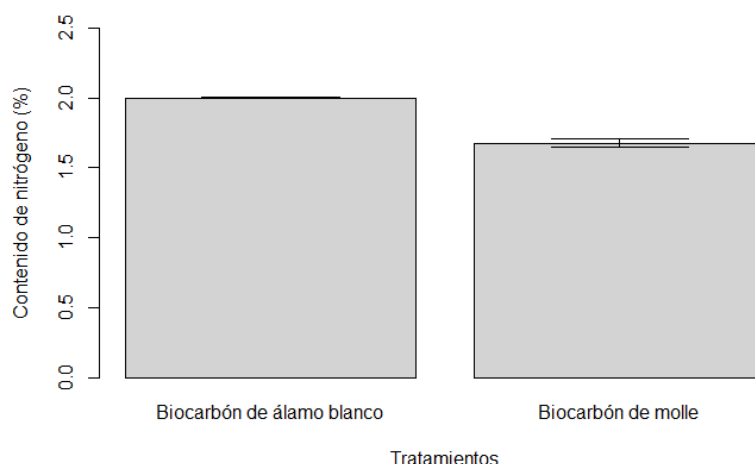


Figura 78: Error estándar (EE) de los porcentajes de azufre del biocarbón de álamo blanco y molle

Castro (2018) obtiene un contenido de azufre del 0.02 % en la biomasa de pino, este valor tiene relación con los porcentajes obtenidos en la biomasa de álamo blanco y biocarbón de 0.03 % y 0.021 % respectivamente. De acuerdo con los técnicos de la empresa INTAGRI (2017), el contenido de azufre es un elemento importante en las plantas debido a que protege las células e impide el deshumedecimiento en climas de calor y en épocas de sequía, también ayuda en la preservación en temperaturas bajas. Por su parte, Carmona (2015) manifiesta que el azufre es importante en la generación de proteínas en la células.

4.7 Caracterización física y análisis estadístico del biocarbón

La caracterización física del biocarbón de álamo blanco y molle se llevó a cabo mediante el análisis termogravimétrico de los parámetros de humedad, contenido volátil, cenizas y carbono fijo. Se efectuaron tres repeticiones por cada variable física, en la Tabla 63 y 64 se dan a conocer los resultados obtenidos.

Tabla 63: Resultados del análisis termogravimétrico aplicado al biocarbón de álamo blanco en porcentaje

Variables físicas	Repeticiones		
	I	II	III
Humedad	1.701	1.653	1.680
CV	27.974	27.594	27.891
Cenizas	3.190	3.142	3.258
Carbono fijo	58.630	58.240	58.800

Tabla 64: Resultados del análisis termogravimétrico aplicado al biocarbón de molle en porcentaje

Variables físicas	Repeticiones		
	I	II	III
Humedad	2.770	2.650	2.680
CV	30.367	30.909	30.247
Cenizas	4.048	4.011	4.982
Carbono fijo	54.250	54.600	54.20

En la Tabla 65 y 66 se visualiza los resultados adquiridos de los indicadores descriptivos, que se desarrollaron en base a los porcentajes obtenidos de la prueba termogravimétrica de laboratorio aplicada a los dos tipos de biocarbón, para lo cual se estableció medidas de tendencia central y dispersión de datos.

Tabla 65: Análisis descriptivo de la caracterización física del biocarbón de álamo blanco en porcentaje

Variables físicas	Media	Mediana	DE	CV	EE
Humedad	1.678	1.680	0.024	1.433	0.013
Contenido volátil	27.819	27.891	0.199	0.718	0.115
Cenizas	3.196	3.190	0.058	1.823	0.033
Carbono fijo	58.556	58.630	0.287	0.490	0.165

Tabla 66: Análisis descriptivo de la caracterización física del biocarbón de molle en porcentaje

Variables físicas	Media	Mediana	DE	CV	EE
Humedad	2.300	2.280	0.062	2.715	0.036
Contenido volátil	30.507	30.367	0.352	1.156	0.203
Cenizas	4.052	4.048	0.043	1.077	0.025
Carbono fijo	54.423	54.420	0.175	0.321	0.101

A continuación, se realizó una evaluación individual de cada parámetro físico para analizar y comparar los resultados de los tratamientos de biocarbón de álamo blanco y molle.

4.7.1 Humedad.

En la Tabla 67 se exponen los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al contenido de humedad presente en el biocarbón del biocarbón de álamo blanco y molle.

Tabla 67: Porcentajes del contenido de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	1.701	1.653	1.680
Biocarbón de molle	2.770	2.650	2.680

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 79) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de humedad que poseen los dos tipos de biocarbón o tratamientos de estudio.

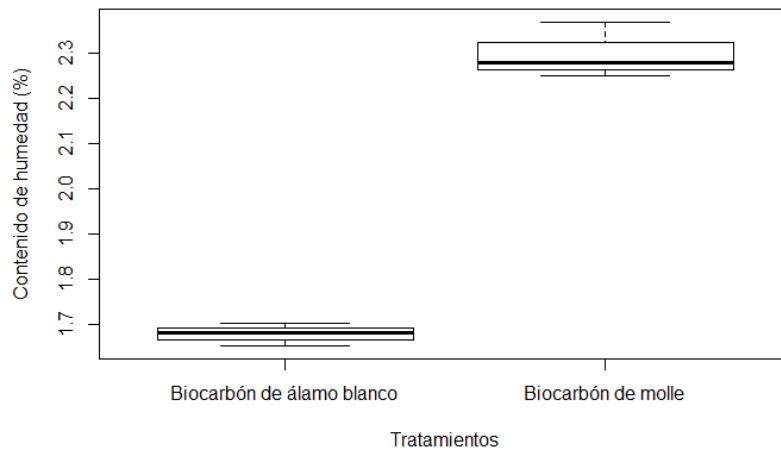


Figura 79: Box-plot de los porcentajes de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 68 se muestran los valores obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los resultados del contenido de humedad de las dos especies de biocarbón.

Tabla 68: Análisis descriptivo de los porcentajes de humedad del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	1.678	1.680	0.024	1.433	0.013
Biocarbón de molle	2.300	2.280	0.062	2.715	0.036

De acuerdo con el análisis descriptivo realizado, la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 1.67 %, con un error estándar (EE) de 0.013 % que se expresa en un intervalo de [1.665 %, 1.691 %], a diferencia de la especie de molle que posee una media aritmética de 2.30 % con un error estándar (EE) de 0.036 % que corresponde a un intervalo de [2.664 %, 2.736 %], obteniendo así que el biocarbón de álamo blanco presenta una menor variabilidad y bajo contenido de humedad, esto se puede comprobar en la Figura 80, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio. Bermeo (2018) obtiene un porcentaje del 1.66 % en el biocarbón obtenido de aserrín de balsa, este resultado tiene relación con el biocarbón de álamo blanco donde se obtiene 1.67 %.

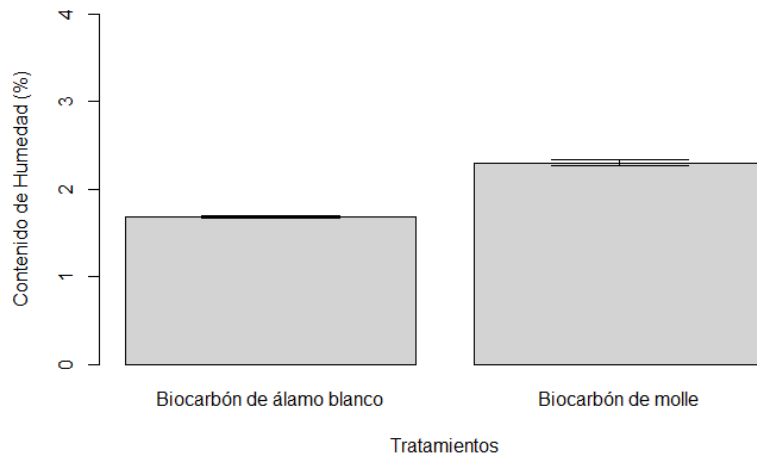


Figura 80: Error estándar (EE) del contenido de humedad en el biocarbón de álamo blanco y molle

4.7.2 Contenido volátil.

En la Tabla 69 se exponen los resultados del análisis termogravimétrico con respecto al contenido volátil del biocarbón de las especies de álamo blanco y molle.

Tabla 69: Porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	27.974	27.594	27.891
Biocarbón de molle	30.367	30.909	30.247

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 81) se visualiza la distribución de los datos y el contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle.

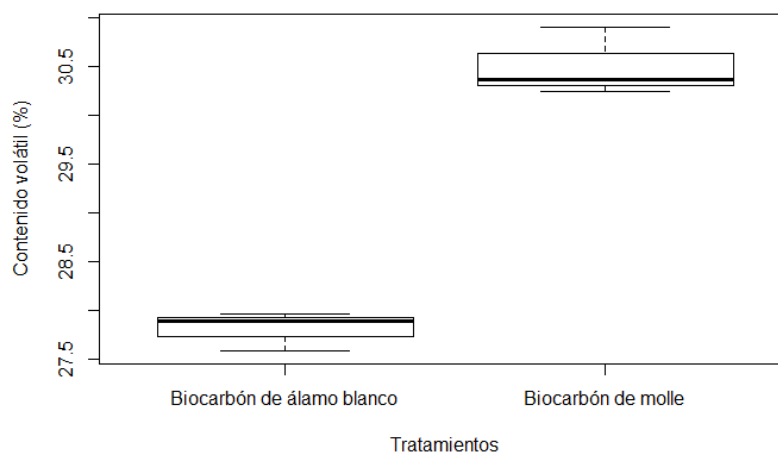


Figura 81: Porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 70 se observa los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos, que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle.

Tabla 70: Análisis descriptivo de los porcentajes del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	27.819	27.891	0.199	0.718	0.115
Biocarbón de molle	30.507	30.367	0.352	1.156	0.203

El contenido volátil del biocarbón de álamo blanco posee un valor promedio de 27.819 % con un error estándar (EE) de 0.115 %, que corresponde a un intervalo de [27.704 %, 27.934 %], por lo contrario en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 30.507 % con un error estándar (EE) de 0.203 % que resulta en un intervalo de [30.304 %, 30.71 %], obteniendo así que el biocarbón de álamo blanco presenta menor variabilidad en la experimentación y presenta bajo contenido volátil. Esto se puede comprobar en la Figura 79, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.



Figura 82: Error estándar (EE) del contenido volátil del biocarbón de álamo blanco y molle

Castro (2018) en la caracterización de la biomasa residual de pino tiene un promedio del 29.63 %, igualmente Delvasto & Pardavé (2017) tienen un porcentaje de 35% en biomasa obtenida de arbustos de poda, estos valores anteriormente señalados presentan similitud con los porcentajes obtenidos en la biomasa de álamo blanco y molle, donde se obtiene un valor de 27.8 % y 30.5%, respectivamente.

Rebolledo et al. (2019) expresan que entre los 250 °C – 350 °C de temperatura, se generan varios compuestos volátiles como vapor de agua, alquitrán, hidrocarburos, ácidos, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Delvasto & Pardavé (2017) manifiesta

que los componentes volátiles hacen referencia a los elementos que se transforman en gas cuando se incrementa la temperatura de un producto.

El porcentaje de materia volátil resultó diferente en ambas muestras, siendo la muestra de molle, la que presentó mayor valor para este parámetro. El contenido volátil está compuesto, primordialmente, por hidrocarburos lineales e hidrocarburos aromáticos, tanto de cadena corta como de cadena larga. Su presencia en el biocarbón no sólo es función de la composición química de la biomasa precursora, sino también de la temperatura de procesamiento durante la pirolisis (Delvasto & Pardavé, 2017).

4.7.3 Cenizas.

En la Tabla 71 se exponen los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al contenido de cenizas que se obtiene durante el proceso de análisis del biocarbón de álamo blanco y molle.

Tabla 71: Porcentajes del contenido de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	3.190	3.142	3.258
Biocarbón de molle	4.048	4.011	4.982

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 81) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de cenizas que poseen los dos tipos de biocarbón.

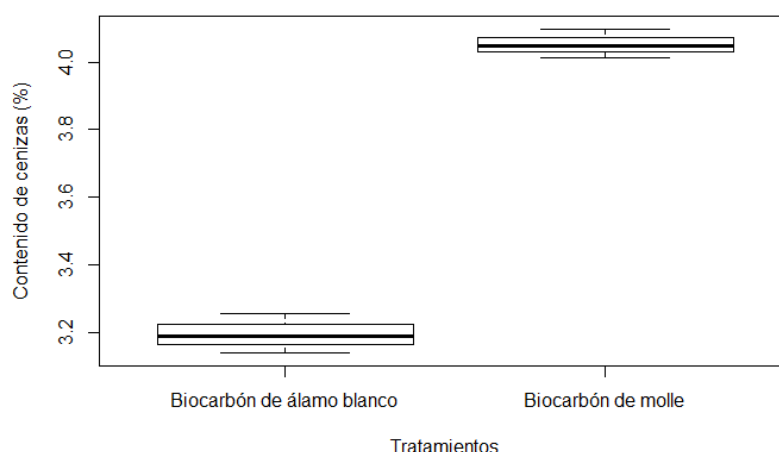


Figura 83: Box-plot del contenido de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 72 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido de cenizas del biocarbón o tratamientos de estudio.

Tabla 72: Análisis descriptivo de los porcentajes de ceniza del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	3.196	3.190	0.058	1.823	0.033
Biocarbón de molle	4.052	4.048	0.043	1.077	0.025

En el contenido de cenizas la biomasa de álamo blanco se tiene un valor promedio de 3.196 % con un error estándar (EE) de 0.033 %, que corresponde a un intervalo de [3.163 %, 3.229 %], por lo contrario en la especie de molle se obtiene un porcentaje del 4.052 % con un error estándar (EE) de 0.025 % que resulta en un intervalo de [4.027 %, 4.077 %], por lo cual se aprecia que la especie de molle presenta menor variabilidad en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 84, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.

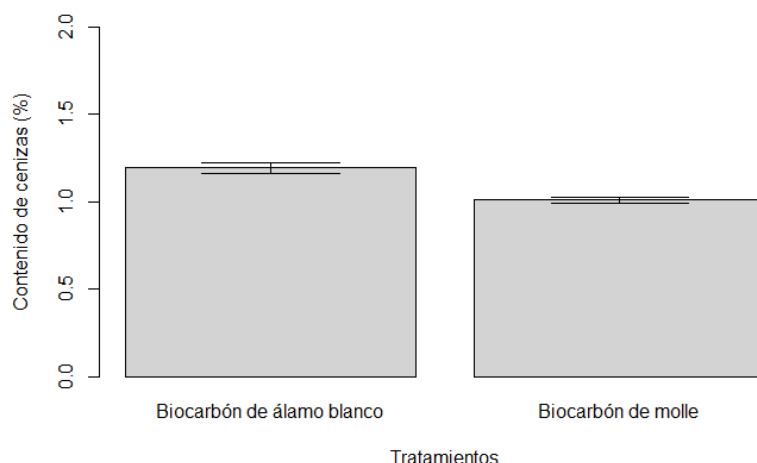


Figura 84: Error estándar (EE) de los porcentajes de cenizas del biocarbón de álamo blanco y molle

Castro (2018) tiene un valor del 3.37 % de ceniza en la caracterización física de la biomasa de pino, de igual forma el estudio de Manals et al. (2011) realizado con residuos de pino tiene un valor de 2.3 %, comprobando así la similitud con los promedios obtenidos en el álamo blanco de 3.19 % y 4.05 % en la biomasa de molle. De igual forma Bermeo (2018) explica que mientras mayor sea la temperatura durante la torrefacción los minerales que contiene la materia prima se separan, de esta manera incrementando el contenido de cenizas que se obtienen como resultado después de aplicar una temperatura y tiempo en específico. Por otro lado, el contenido de cenizas en los diferentes biocarbón se relaciona con las sustancias minerales (inorgánicas) que se encuentran presentes en la biomasa original y que no son transferidas ni a la fase gaseosa ni a las fases líquidas durante la pirolisis (Delvasto & Pardavé, 2017).

4.7.4 Carbono fijo.

Los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico con respecto al porcentaje de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle que se obtiene como resultado después del proceso de análisis, se exponen en la Tabla 73.

Tabla 73: Contenido de carbono fijo de la biomasa residual de álamo blanco y molle en porcentaje

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	58.630	58.240	58.800
Biocarbón de molle	54.250	54.600	54.420

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 85) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de carbono fijo que posee el biocarbón de estudio.

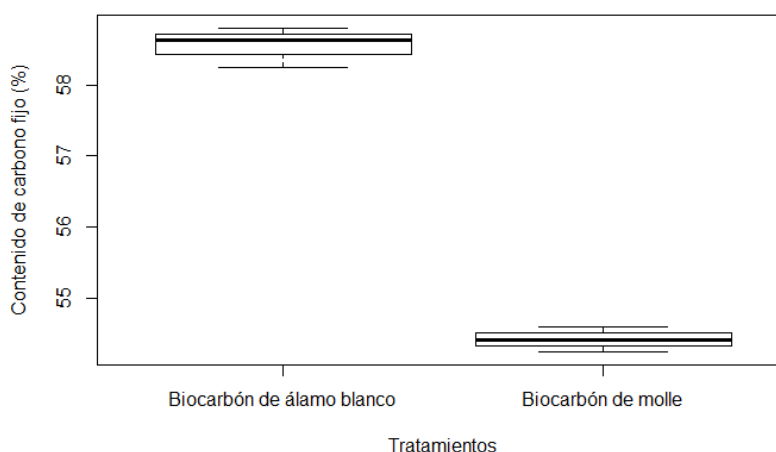


Figura 85: Box-plot de los porcentajes de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle

En la Tabla 74 se muestran los resultados obtenidos de los indicadores descriptivos de tendencia central y dispersión de datos que se desarrollaron en base a los porcentajes del contenido de carbono fijo de las especies de biomasa residual de estudio.

Tabla 74: Análisis descriptivo de los porcentajes de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	58.556	58.630	0.287	0.490	0.165
Biocarbón de molle	54.423	54.420	0.175	0.321	0.101

El porcentaje de carbono fijo presente en el tratamiento de álamo blanco es de 58.55 % con un error estándar (EE) de 0.165 %, que corresponde a un intervalo de [58.391 %, 58.721 %], por lo contrario, el biocarbón obtenido a partir de la biomasa residual de molle alcanza un porcentaje del 54.423 % con un error estándar (EE) de 0.337 % que resulta en un intervalo de [54.322 %, 54.524 %]. Por lo tanto, se asume que la especie de molle

presenta menor variabilidad en los resultados, esto se puede comprobar en la Figura 86, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que representan los porcentajes alcanzados en esta variable de estudio.

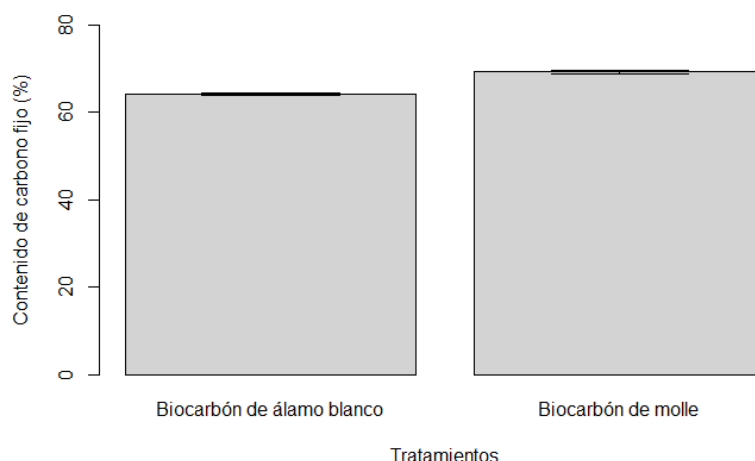


Figura 86: Error estándar (EE) de los porcentajes del contenido de carbono fijo del biocarbón de álamo blanco y molle

Castro (2018) en la biomasa de pino obtiene un porcentaje del 59.93 %, obteniendo un valor similar en el álamo blanco del 58.55 % y en la especie de molle del 54.43%. De igual modo, Delvasto & Pardavé (2017) obtuvieron un porcentaje del 49.18 % en el biocarbón obtenido con los residuos de podas de jardín conformados por ramas y troncos de árboles y arbustos. El contenido de carbono fijo es el residuo del análisis del contenido de materia volátil y se determina restando a 100 la suma de los porcentajes de humedad, material volátil y cenizas, todos referidos en base seca (Segura, 2019).

Al obtener un porcentaje mayor de carbono fijo con relación al material volátil, significa que durante la producción del biocarbón se generó un bajo contenido de gases contaminantes de la atmósfera, como el monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos nítricos o amoníaco, lo cual disminuye el impacto ambiental favoreciendo a la protección del medio ambiente (Castro, 2018), de igual manera se obtiene presente una mayor cantidad de nitrógeno en el biocarbón que favorece al crecimiento de las plantas.

4.8 Poder calórico del biocarbón

Se realizó el análisis de poder calórico superior (PCS) e inferior (PCI) para conocer el contenido de poder calórico que tienen el biocarbón de álamo blanco y molle.

4.8.1 Poder calórico superior (PCS).

Los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico superior (PCS) presente en el biocarbón de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 75.

Tabla 75: Resultados del poder calórico superior aplicado a los tratamientos de estudio en Cal/g

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	7852.20	7873.90	7864.60
Biocarbón de molle	6038.00	6016.70	6046.90

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 87) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de poder calórico superior que posee el biocarbón de estudio.

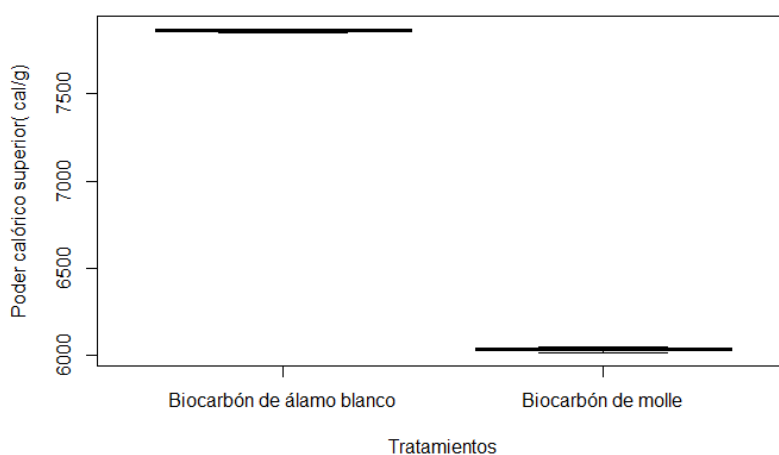


Figura 87: Box-plot del contenido de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g

En la Tabla 76 se puede visualizar los resultados adquiridos en los indicadores descriptivos, que se desarrollaron en base a los porcentajes obtenidos, donde se describen las medidas de tendencia central y dispersión de datos.

Tabla 76: Análisis descriptivo de los resultados de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	7863.567	7864.600	10.887	0.138	6.286
Biocarbón de molle	6033.867	6038.000	15.518	0.257	8.960

El poder calórico superior en la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 7863.56 Cal/g con un error estándar (EE) de 6.28 Cal/g, que resulta en un intervalo estimado de [7857.28 Cal/g, 7869.84 Cal/g], mientras que la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 6033.86 Cal/g con un error estándar (EE) de 8.96 Cal/g,

que corresponde a un intervalo de [6024.90 Cal/g, 6042.827 Cal/g], de esta manera se obtiene un mayor contenido calórico en el tratamiento de álamo blanco y menor variabilidad en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 88, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de poder calórico de cada uno de los sustratos de estudio. De igual forma Delvasto (2017) en su investigación realizada con residuos leñosos provenientes de podas de jardín tiene un contenido calórico de 6270 Cal/g. Durante el proceso de torrefacción la fracción volátil contiene ácidos carboxílicos, agua y gases permanentes. Con, la remoción de esta fracción orgánica, se elimina gran parte del oxígeno de la biomasa, por lo que el poder calorífico del sólido se incrementa a expensas de una reducción en el peso (Arteaga, Segura et al., 2015).



Figura 88: Error estándar (EE) del contenido de poder calórico superior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g

4.8.2 Poder calórico inferior (PCI).

Los resultados obtenidos en el análisis de poder calórico inferior presente en la biomasa residual de las especies de álamo blanco y molle se exponen en la Tabla 77.

Tabla 77: Resultados del poder calórico inferior aplicado a los tratamientos de estudio en Cal/g

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
Biocarbón de álamo blanco	7270	7287	7259
Biocarbón de molle	5436	5469	5453

En el gráfico de caja o boxplot (Figura 89) se visualiza la distribución de los datos y el contenido de poder calórico inferior que posee el biocarbón de estudio.

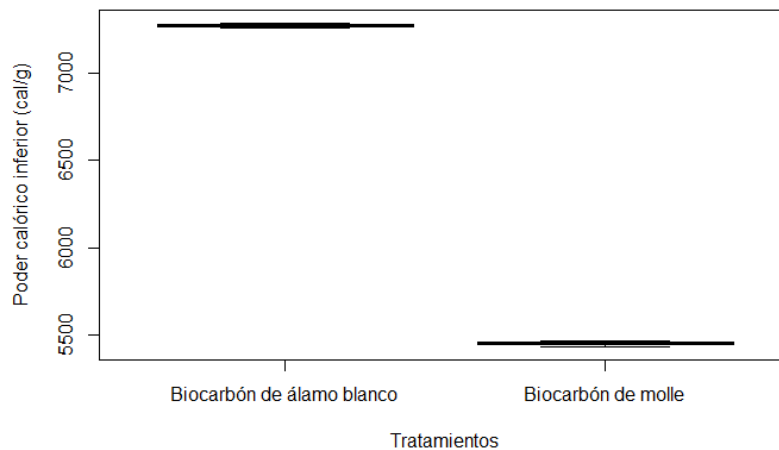


Figura 89: Box-plot del contenido de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal / g

En la Tabla 78 se puede visualizar los resultados adquiridos en los indicadores descriptivos, que se desarrollaron en base a los porcentajes obtenidos del poder calórico inferior, donde se describen las medidas de tendencia central y dispersión de datos.

Tabla 78: Análisis descriptivo del de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g

Tratamientos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Biocarbón de álamo blanco	7272	7270	14.106	0.193	8.144
Biocarbón de molle	5452	5453	16.502	0.302	9.527

El poder calórico superior en la biomasa residual de álamo blanco presenta un valor promedio de 7272 Cal/g con un error estándar (EE) de 8.144 Cal/g, que resulta en un intervalo estimado de [7263.85 Cal/g, 7280.14 Cal/g], mientras que la especie arbórea molle tiene un valor promedio de 5452 Cal/g con un error estándar (EE) de 9.52 Cal/g, que corresponde a un intervalo de [5442.48 Cal/g, 5461.52 Cal/g], de esta manera se obtiene un mayor contenido calórico en el tratamiento de álamo blanco y menor variabilidad en la experimentación, esto se puede comprobar en la Figura 90, donde se elaboró una gráfica de boxplot a partir del error estándar que presentan los porcentajes obtenidos en el contenido de poder calórico de cada uno de los tratamientos de estudio.



Figura 90: Error estándar (EE) del contenido de poder calórico inferior del biocarbón de álamo blanco y molle en Cal/g

Delvasto & Pardavé (2017) da a conocer que el poder calorífico de la biomasa obtenida de la poda de arbustos y árboles ornamentales, posee una cantidad de 5089 Cal/g, valor que presenta similitud con el contenido calorífico de las especies de estudio. El tiempo de exposición al calor en menor medida afecta la descomposición térmica de la biomasa, al aumentar el tiempo de residencia en la torrefacción aumenta el poder calorífico, sin embargo, mientras mayor es el tiempo de residencia, menor será el rendimiento en masa y energía (Arteaga et al., 2015). Durante el proceso de pirolisis se produce un enriquecimiento en el carbono, el cual conlleva un aumento del poder calorífico de estos productos sólidos respecto de los residuos biomásicos de los que proceden (Pérez, 2016).

4.9 Relación Carbono – Nitrógeno del biocarbón

Se realizó la evaluar el contenido de los parámetros de carbono y nitrógeno, con la finalidad de analizar la relación Carbono - Nitrógeno (C / N) del biocarbón de molle y álamo blanco), estos elementos son indispensables para el desarrollo del ciclo natural. A continuación, en la Tabla 79 se expone los resultados obtenidos en la relación C / N del biocarbón.

Tabla 79: Resultados del análisis de la relación C / N en porcentaje del biocarbón

Tratamientos	Variables químicas	Valor	Relación C / N
Biocarbón de álamo blanco	Carbono	60.907	30.542
	Nitrógeno	1.994	
Biocarbón de molle	Carbono	56.115	34.724
	Nitrógeno	1.616	

El biocarbón de álamo blanco obtiene un porcentaje de carbono – nitrógeno de 30.54 %, por lo contrario el biocarbón de molle tiene un promedio de 34.72 % y Trujillo (2017) postula que esta relación es un señalizador, de que un material sirve para identificar

la capacidad de mineralización y fijación de nitrógeno en el suelo, también señala que un porcentaje alto en esta relación ocasiona inmovilidad de nitrógeno gracias a los microorganismos, esto puede generar insuficiencia de este componente para el desarrollo de las plántulas. Con respecto al contenido de carbono y nitrógeno, la relación C/N es un factor importante a considerar en la aplicación de enmiendas, ya que se debe tener una relación C/N que no sea superior a aproximadamente 30 para evitar la inmovilización con nitrógeno (Segura, 2019).

4.10 Resultados de los ensayos experimentales de las plántulas de girasol.

La adición de biocarbón al medio de cultivo resultó en un efecto positivo para el desarrollo del girasol (*Helianthus annuus*), tanto en la germinación como el número de brotes por semilla. En la Tabla 80 y 81 se visualiza los valores del promedio de crecimiento semanal del tallo en cada repetición hallados durante la germinación de las plantas en las ocho semanas. El experimento consta de tres tratamientos: álamo blanco, molle y testigo, cada uno con dos tipos de dosis: alta (Dosis II) y baja (Dosis I), lo que converge en un análisis factorial de 2x3.

Tabla 80: Datos de la tasa de crecimiento semanal del tallo y repeticiones (en cm) de los tratamientos de estudio con relación a la Dosis I (1:10)

Repeticiones	Álamo blanco (AI)	Molle (Mo)	Testigo (T)
1	0.932	0.536	0.268
2	0.957	0.549	0.257
3	0.943	0.529	0.257
4	0.950	0.555	0.274

Tabla 81: Datos de la tasa de crecimiento semanal del tallo y repeticiones (en cm) de los tratamientos de estudio con relación a la Dosis II (1:5)

Repeticiones	Álamo blanco (AI)	Molle (Mo)	Testigo (T)
1	1.364	0.730	0.308
2	1.347	0.734	0.311
3	1.349	0.730	0.313
4	1.343	0.742	0.315

En la Tabla 82 se visualiza el promedio total de la tasa de crecimiento obtenido de las ocho semanas con respecto a cada tratamiento y dosis aplicada.

Tabla 82: Promedios de la tasa de crecimiento semanal (en cm) de los tratamientos en las ocho semanas de experimentación

Dosis	Álamo blanco (Al)	Molle (Mo)	Testigo (T)
Dosis I (1:10)	0.946	0.542	0.264
Dosis II (1:5)	1.351	0.734	0.312

Se obtuvo una mayor tasa de crecimiento semanal del tallo en el tratamiento elaborado a partir del biocarbón de álamo blanco a una dilución de 1:5 (Dosis II), donde se tiene un valor de 1.35 cm, mientras que la dilución de 1:10 (Dosis I) posee una tasa promedio de crecimiento menor, alcanzando los 0.95 cm. Por lo contrario, para el biocarbón de molle con una dilución de 1:5 (Dosis II) la tasa de crecimiento semanal del tallo fue de 0.73 cm, sin embargo, en la dilución de 1:10 (Dosis I) se tiene una tasa de crecimiento menor de 0.54 cm.

Con respecto al testigo de la dosis I, se alcanzó un promedio de crecimiento semanal de 0.26 cm, sin embargo, el testigo de la dosis II, fue de 0.31 cm, de esta manera se puede apreciar que existe una diferencia significativa sobre el crecimiento del tallo en comparación con los demás tratamientos, debido a que las plantas no poseen los nutrientes necesarios, que los dos tipos de biocarbón (álamo blanco y molle) proporcionan en beneficio del crecimiento de las mismas. Por su parte, Méndez et al. (2013) expresa que por lo general se obtiene una mayor altura de las plántulas de girasol (*Helianthus annuus*) en ensayos realizados con una dosis alta de biocarbón.

A continuación, en la Figura 91 se presenta un gráfico boxplot construido con los datos de la Tabla 80 y 81, sobre el promedio de crecimiento semanal del tallo (en cm) de la plántula de girasol, aplicados en dos tipos de dosis I (1:10) y II (1:5) con el tratamiento de biocarbón de álamo blanco y molle obtenido a una temperatura de 300 °C, para identificar posibles diferencias significativas, asimetrías, valores atípicos y homogeneidad de varianza entre los distintos tratamientos.

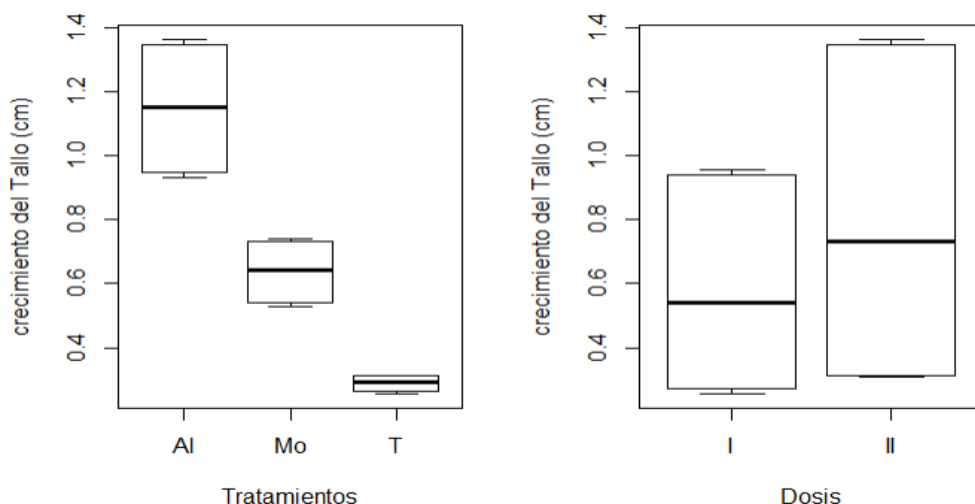


Figura 91: Tasa de crecimiento semanal del tallo con respecto a los tratamientos y los tipos de biocarbón

A partir de la representación gráfica (Figura 91) se aprecia que existe diferencia entre el efecto de los tratamientos, es decir la tasa de crecimiento semanal varía dependiendo del tipo de dosis (I y II) y tratamiento (álamo blanco, molle y testigo) aplicado. Por esta razón, se señala que existe mayor efectividad en el tratamiento de álamo blanco con la dosis II (dilución 1:5), puesto que en las ocho semanas de estudio se obtuvo el promedio más alto de la tasa de crecimiento de las plantas, es decir, el efecto parece ser alto en la dosis II con los tratamientos de: álamo blanco y molle, en comparación de la dosis I, donde se tiene la menor tasa de crecimiento semanal de las plantas. La distribución de las observaciones de cada nivel parece simétrica, sin la presencia de valores atípicos y homocedásticos, de esta manera se satisfacen los supuestos necesarios para un ANOVA, aunque habrá que confirmar esto estudiando la interacción de los tratamientos.

Para el análisis de varianza ANOVA se plantearon dos escenarios que manifiestan el comportamiento de la tasa de crecimiento promedio del tallo, para lo cual, se estableció la hipótesis nula, donde se indica que los promedios de las tasas de crecimiento semanal en todos los tratamientos son iguales y la hipótesis alternativa plantea que al menos hay diferencia en una de las tasas de crecimiento semanal con respecto a las restantes. En la Tabla 83 se muestran los resultados obtenidos del análisis factorial ANOVA de dos vías.

Tabla 83: Análisis de varianza de los datos del crecimiento semanal del tallo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio	F ₀	Valor P
Tratamiento	2.99334	2	1.49667	20468.24	$p < 2.2e^{-16}$
Dosis	0.27672	1	0.27672	3784.42	$p < 2.2e^{-16}$
Interacción	0.12926	2	0.06463	883.85	$p < 2.2e^{-16}$
Residual	0.00132	18	0.00007		

En la Tabla 83 se muestra el análisis de varianza. Puesto que se obtiene un valor de $F_{0.05,2,18} = 883.85$ y un valor de $p < 0.005$, se concluye que hay una interacción significativa entre los tratamientos y tipos de dosis. También, $F_{0.05,2,18} = 20468.24$ y $F_{0.05,1,18} = 3784$, por lo que los efectos principales del tipo de dosis y tratamientos de igual forma son significativos, también se muestran los valores P para los estadísticos de la prueba. Para poder dar por válidos los resultados obtenidos del ANOVA, es necesario verificar la dispersión de los datos de la tasa de crecimiento del tallo, expuestos en la Figura 92.

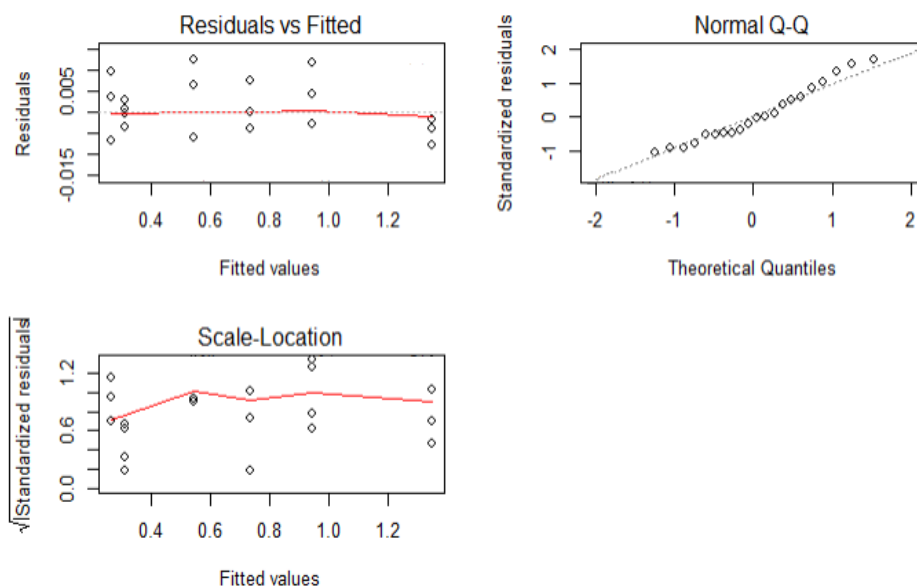


Figura 92: Gráfico del análisis estadístico ANOVA

Los resultados muestran varianza y homocedasticidad para los distintos niveles, la gráfica de probabilidad normal (Q-Q Plot) de estos datos (residuales) no revela nada particularmente problemático, debido a que los datos no se encuentran dispersos y no se observan valores atípicos. La gráfica de los valores residuales con relación a los valores ajustados, demuestra una ligera tendencia de la varianza de los datos residuales a extenderse, cuando la tasa del crecimiento semanal del tallo se incrementa.

Como ayuda para interpretar los resultados de este experimento es conveniente construir una gráfica de interacciones con las respuestas promedio para cada combinación de los tratamientos, la misma que se detalla en la Figura 93. El hecho de que las rectas no sean paralelas indica que la interacción es significativa.

En general, se consigue un mayor promedio de la tasa de crecimiento semanal del tallo con una dosis II, independientemente del tipo de tratamiento. Al cambiar de una dosis baja a una dosis alta, la tasa de crecimiento semanal del tallo con el tratamiento de álamo blanco presenta un incremento real, mientras que con los tratamientos de molle y

testigo disminuyen. El tratamiento de álamo blanco parece producir los mejores resultados si se quiere un mayor incremento de la tasa de crecimiento semanal del tallo cuando la dosis cambia. En este experimento, la interacción es significativa. Cuando la

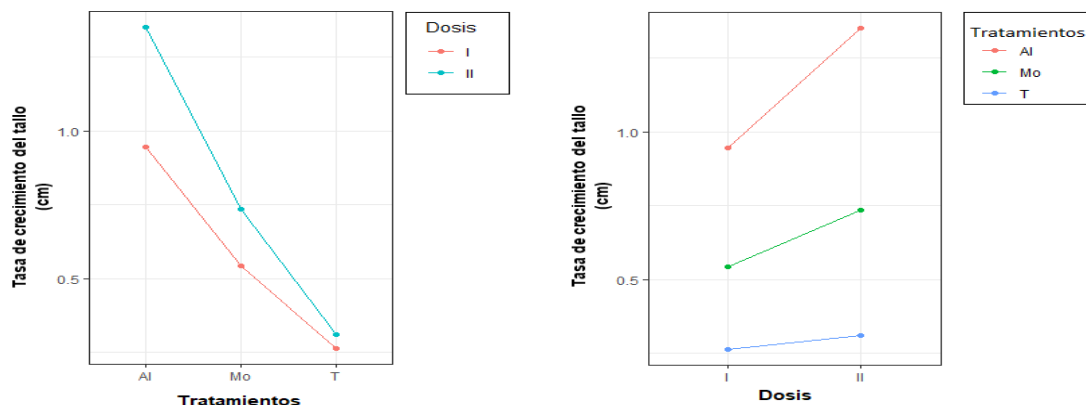


Figura 93: Gráficos de interacción sobre la tasa de crecimiento del tallo

interacción es de esta clase, las comparaciones entre las medias de uno de los factores (por ejemplo, A: tratamientos), pueden ser oscurecidas por la interacción AB (tratamientos y dosis). Una forma de abordar esta cuestión consiste en fijar el factor B (Dosis) en un nivel específico. El interés se encuentra en detectar las diferencias entre las medias de los tres tipos de tratamientos, puesto que la interacción es significativa, esta comparación se hace con un solo nivel de dosis, para ello se establece la dosis II. Por lo que esto tiene que ser confirmado mediante el análisis de varianza ANOVA (Tabla 84), para determinar si las diferencias observadas son significativas.

Tabla 84: Análisis de varianza de los datos del crecimiento semanal del tallo, con respecto a la dosis II y los tratamientos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad (df)	Cuadrado medio	F_0	Valor P
Dosis II	2.1833	2	1.091656	27732	$p < 8.82e^{-18}$
Residual	0.00035	9	3.933639E-05		

Este análisis indica que con el nivel de dosis II, el promedio de la tasa de crecimiento semanal del tallo para los tratamientos molle y testigo no presentan mayor efectividad mientras que para el tratamiento de álamo blanco la diferencia es significativa. De esta manera se comprueba que el tratamiento de álamo blanco con la dosis II, tuvo mejores resultados como aditivo en la germinación de las plántulas de girasol.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

Se caracterizó física y químicamente la biomasa residual de álamo blanco y molle, obteniendo 44.69 % de carbono, 6.40 % de hidrógeno, 19.34 % de oxígeno, 1.04 % de nitrógeno y 0.12 % de azufre, en la segunda especie se alcanzó un porcentaje de 44.23 % en carbono, 6.34 % de hidrógeno, 19.19 % de oxígeno, 0.77% de nitrógeno y de azufre 0.32 %, así obteniendo una menor variabilidad de los resultados en la especie de álamo blanco con relación a los porcentajes conseguidos en el análisis de error estándar. Con respecto a la caracterización física de la biomasa de álamo blanco se obtuvo 7.33 % de humedad y 8.90 % en la biomasa de molle, cumpliendo con la normativa para la elaboración de biocarbón.

El biocarbón de álamo blanco y molle se obtuvo mediante el método de torrefacción a una temperatura de 300 °C en un lapso de 2 horas, este método de carbonización es recomendado, debido a que en el proceso de elaboración del biocarbón se obtuvo un porcentaje bajo en el contenido de volátiles del 27 % en la producción del biocarbón de álamo blanco y 30 % en la especie de molle, lo cual significa que no existe una gran emanación de gases contaminantes que afectan a la atmósfera y a los recursos medioambientales en general.

Con relación a los resultados obtenidos en la caracterización química y física del biocarbón de álamo blanco se obtiene un bajo contenido de cenizas de 3.20 %, un alto contenido de carbono fijo de 58.55 %, el cual es un indicador importante en un tipo de biocarbón para capturar carbono y una baja presencia de azufre de 0.034 %, igualmente el biocarbón de molle tiene un bajo contenido de cenizas de 4.052 % un alto contenido de carbono fijo de 54.43 % y una baja presencia de azufre de 0.0214 %, por todas estas características señaladas se puede reconocer y garantizar la calidad que tienen los dos tipos de biocarbón producidos, debido a que las características antes mencionadas se presentan en la literatura como requisitos para garantizar la viabilidad del producto obtenido.

En las pruebas efectuadas para obtener la tasa de crecimiento semanal, el tratamiento de álamo blanco fue efectivo como aditivo para mejorar el desarrollo de las plántulas de girasol (*Helianthus annuus*), debido a que posee una mayor tasa de crecimiento semanal del tallo, ya sea con una dosis alta o baja. Sin embargo, la tasa de crecimiento semanal resultó significativo en las unidades experimentales aplicadas con la dosis II, considerada como concentración alta (dilución 1:5).

En su efecto, el biocarbón obtenido con la especie de álamo blanco, aplicado en las diluciones con la dosis II presenta una mayor viabilidad y aptitud en el crecimiento de las plantas logrando un porcentaje del 1.35 % en la tasa de crecimiento semanal del tallo, por lo contrario se obtuvo la menor tasa de crecimiento en el testigo de 0.2 %, en estas unidades experimentales las plántulas de girasol (*Helianthus annuus*) empezaron a marchitarse y presentar características negativas, debido a la falta de una fuente de nutrientes.

En el contenido de poder calórico superior de la biomasa de álamo blanco se obtuvo un valor de 4333.96 Cal/g y en molle de 4285.93 Cal/g, y en el contenido de poder calórico inferior se obtuvo una cantidad de 2063.66 Cal/g en la especie de álamo blanco y molle 1395.66 Cal/g, lo cual podría ser beneficioso para obtener otro tipo de aplicación con la biomasa y convertirla en biocombustible como una alternativa de energía limpia, el PCI o neto es de interés debido a que en la condensación el vapor de agua en donde se halla el gas resultante no se utiliza.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Implementar la metodología propuesta en esta investigación con otros tipos de residuos orgánicos o biomasa arbórea, con el fin de aprovechar estos desechos para convertirlos en biocarbón y de esta manera disminuir el incremento de los residuos sólidos dentro de la ciudad de Cuenca.
- Se sugiere aplicar diferentes niveles de dosis que representan la concentración del biocarbón en las diluciones, las mismas que servirán como tratamiento para determinar la tasa de crecimiento de las plántulas y así identificar la aptitud del biocarbón obtenido.
- Se recomienda realizar un estudio técnico de los gases generados por el módulo termogravimétrico durante el proceso de combustión de la biomasa para la obtención de biocarbón.
- En base a los resultados obtenidos en esta investigación, el tratamiento con mayor efectividad fue el biocarbón de álamo blanco, por lo cual se podría implementar como aditivo al suelo para medir el rendimiento en los cultivos de girasol (*Helianthus annuus*) y su efectividad en el desarrollo de las plantas.
- El biocarbón obtenido con los residuos de podas de los árboles de álamo blanco y molle son efectivos como aditivo para el desarrollo de las plantas y proporcionan nutrientes al suelo, por lo cual podría sustituir a los productos químicos que son utilizados como potenciadores y que ocasionan problemas, como la erosión del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenza, D. P. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. In *The European Union's Eco-Management and Audit Scheme (EMAS)*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Abril, A., & Navarro, E. (2014). Etanol a partir de biomasa lignocelulósica. *ResearchGate*, 1, 1–103.
- Al-Kassir, R. (2013). *Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante*. Escuela superior de tecnología y gestión.
- Alcañiz, J.-M. (2013). Efectos del biochar sobre el secuestro de carbono y la biodiversidad edáfica en suelos mediterráneos (MEDICCHAR). In *Enero*.
- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J., & Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Boletín Del Grupo Español Del Carbón*, 3, 2–6.
- Arévalo, D. (2019). *Obtención de biochar a partir de la biomasa de podas forestales de la zona urbana de la ciudad de Cuenca*. Universidad Católica de Cuenca.
- Arteaga-Crespo, Y., Carballo-Abreu, L., García-Quintana, Y., Alonso-López, M., & Geadalópez, G. (2012). *Caracterización del aserrín de Acacia mangium Willd para la obtención de biocarbón*. 8, 90–95.
- Arteaga, E., Flores, M., Escobar, M., Segura, C., & Gordón, A. (2015). Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de Pinus Radiata. *Revista Energética - Unal*, 4, 5–12.
- Arteaga, E., Segura, C., & Diéguez, K. (2015). *Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica*.
https://www.researchgate.net/publication/304017080_Procesos_de_torrefaccion_para_valorizacion_de_residuos_lignocelulosicos_Analisis_de_posibles_tecnologias_de_aplicacion_en_Sudamerica
- Atuesta, L., & Sierra, F. (2015). *Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50 / 50 carbón bituminoso / madera residual*. Universidad de Pamplona.
- Baculima, L. (2011). *Servicios de mantenimiento, recuperación y administración de áreas verdes*. Universidad de Cuenca.
- Balboa, Á. (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*. Universidad Santiago de Compostela.
- Barroso, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bermeo, L. (2018). *Obtención de biocarbón mediante torrefacción seca a partir de residuos de balsa (Ochroma pyramidale)*. Escuela Politécnica Nacional.
- Brick, S., Lehmann, J., & Kramer, J. (2010). Biochar : Assessing the Promise and Risks To Guide U . S . Policy Author. *NRDC*, 1(November), 1–24.
- Carmigniani, C. (2017). *Evaluación agronómica de cinco distanciamientos de siembra en el cultivo de girasol (Helianthus annuus L .) en la zona de Pangua*. Universidad

Técnica Estatal de Quevedo.

- Carmona, R. (2015). *Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible*. Universidad de Córdoba.
- Castro, C. (2018). *Evaluación del proceso de Pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual residual proveniente del Pino patula en atmosfera de dióxido de carbono*. Universidad Libre de Colombia.
- Cevallos, E., Gómez, L., & Roldan, A. (2014). Revista Científica Interdisciplinaria Investigación y Saberes. *ResearchGate*, 1(December), 1–16.
- Chew, J., & Doshi, V. (2011). Avances recientes en el tratamiento previo de biomasa - Fundamentos y tecnología de la torrefacción. *ScienceDirect*, 15, 7–8.
- Chica, D., & López, M. (2018). *Efecto de la aplicación de dos tipos de fertilizantes sobre el comportamiento agronómico del girasol (Helianthus annuus), en la zona de San Juan*. Universidad Técnica de Babahoyo.
- Chicaiza, R. (2017). *DURACIÓN DE LAS ETAPAS FENOLÓGICAS Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE TRES ACCESIONES DE GIRASOL (Helianthus annuus L.) EN EL SECTOR QUEROCHACA, CANTÓN CEVALLOS, PROVINCIA DE TUNGURAHUA*. Universidad técnica de Ambato Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución del Ecuador*. <https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec030es.pdf>
- Cordero, P., Vanegas, S., & Hermida, M.-A. (2015). La biodiversidad urbana como síntoma de una ciudad sostenible. Estudio de la zona del Yanuncay en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 6(1), 107–130. <https://doi.org/10.18537/mskn.06.01.09>
- Cueto, M. (2016). *Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de E.D.A.R., de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agrónomos.
- Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy and Fuels*, 18(2), 590–598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>
- Delvasto, P., & Pardavé, W. (2017). Caracterización fisicoquímica y morfológica de dos muestras de biocarbón producidas mediante pirólisis de residuos de poda y jardinería. *ResearchGate*, 1, 304–310.
- Domínguez, G., Aguirre, A., Jiménez, J., Rodríguez, R., & Díaz, A. (2009). *Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León* (Vol. 15, Issue 1). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Domínguez, M. (2015). *Pirólisis y gasificación de biomásas: optimización del proceso de transformación energética mediante distintos sistemas de reacción* (Vol. 1). Universidad Politécnica de Madrid.
- El Tiempo. (2019). *Espacio de áreas verdes en Cuenca*. 0, 1–8. <https://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/insuficiente-espacio-de-areas-verdes-en-cuenca>
- EMAC EP. (2014). *Compostaje*. 2–3. <https://www.emac.gob.ec/?q=content/compostaje>
- EPEC. (2014). Energía renovable : la biomasa Conceptos y definiciones. *División Gestión Ambiental*, 6, 8.

- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, C., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbon (Biochar) I: Naturaleza, fabricación y uso en el suelo. *Red de Revistas Científicas de América Latina, Volumen 34, Numero3, 1*, 367–382.
- FAO. (2014). *Carbón vegetal*. 3. <http://www.fao.org/3/a-bp846s.pdf>
- Feldpausch, T., Phillips, O., Brienen, R., Araujo, A., Parada, A., Terán, J., & Baker, T. (2011). *Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajos Necromass in forests of Madre de Dios, Peru: a comparison between terra firme and lowland forests*. 18(1), 113–118.
- Ferro, T., & Soler, B. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*, 1, 180–186.
- García, B., Parra, C., Ruíz, P., Ángel, J., Javier, J., Díaz, H., & Ciro, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión Chemistry of plant biomass upon yield during torrefaction: a review. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7, 1–21.
- García, P. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LA PARROQUIA EL VECINO – CUENCA Y ESTIMACIÓN DEL METANO TEÓRICO GENERADO POR LOS MISMOS*. Universidad Internacional SEK.
- Gilces Reyna, M. A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. In *Tesis*. Universidad de Valladolid.
- Goleman, D., Boyatzis, R., & Mckee, A. (2019). Árboles y arbustos de Cuenca. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Universidad del Azuay.
- Guerra, P. (2015). *“Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana”*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Heredia, M., & Tarelho, L. A. C. (2018). Producción de biochar como alternativa para la valorización energética de la biomasa residual generada en el sector agroindustrial Ecuatoriano: un enfoque participativo. *Grupo Español Del Carbón*, 49(September), 6–11.
- Herguedas, I., Taranco, C., Rodríguez, E., & Prieto, P. (2012). Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad. *Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario*, 1, 4–216.
- Herrera, D. (2018). *PIRÓLISIS DE BIOMASA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBÓN Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE TOMATE* (Vol. 15, Issue 2) [Universidad Rafael Landívar]. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2004.3.66178>
- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., & Gómez, M. (2018). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- IMARTEC. (2014). ¿Es realmente la biomasa neutra en emisiones de carbono? *Www.Imartec.Es*, 1. <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>
- INEC. (2010). Estadística Demográfica en el Ecuador: Diagnóstico y Propuestas. *Instituto Nacional de Estadística y Censos*, 1, 1–86.
- Instituto Nacional de Preinversión. (2014). *Atlas bioenergético del Ecuador*. <http://historico.energia.gob.ec/biblioteca/>

- INTAGRI. (2017). *No Title*. Importancia Del Azufre (S) En Las Plantas. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/importancia-del-azufre-s-en-las-plantas>
- Jara, J. (2015). " La deforestación de los bosques protectores como un atentado al Derecho al Buen Vivir en la Legislación Ecuatoriana ." In *Tesis de grado*. Universidad Central del Ecuador.
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 26, 1–4.
- Laboratorio de Técnicas Espectroscópicas - LABTE. (2013). *Análisis elemental*. Universidad Rey Carlos. <http://www.labte.es/index.php/es/2013-11-03-19-54-23/analisis-elemental>
- LECO Corporation. (2014). *Analizador termogravimétrico TGA701*. 1–4. https://pdf.medicaexpo.com/pdf/leco/tga701/123629-196929-_4.html
- LECO Corporation. (2015). *Calorímetro semiautomático AC600*. <https://www.leco.com/product/ac600>
- LECO Corporation. (2016). *Determinador Elemental 628 Series*. https://www.leco.com/images/Products/elemental/628/628-SERIES_209-218.pdf
- Lefèvre, C., Rekik, F., V, A., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo el potencial oculto*. 11–90. www.fao.org/publications
- Major, J. (2008). *El biocarbón: Una herramienta para el manejo sostenible de suelos y la producción de energía*. Cornell University.
- Manals, E., Penedo, M., & Giralt, G. (2011). Análisis y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, XXXI(2), 9.
- Marín, J., García, M., & Barrezueta, S. (2018). *Elaboracion de biocarbón obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano*. 6, 1–7. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/221/248>
- Martínez, C. (2015). *Efectos de enmiendas de biochar sobre el desarrollo en Cucumis*. http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5921/Martinez_Chavez_Carla_Cristina.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mateos, E. (2018). *Producción de biochar a partir de material bioestabilizado*. Universidad de Valladolid.
- Mclaughlin, H., Anderson, P., Shields, F., & Company, K. D. (2009). All Biochars are Not Created Equal , and How to Tell Them Apart. *ResearchGate*, 2, 4–10.
- Méndez, J., Rodríguez, J., López, V., Castellet, J., García, M., Correa, A., & Villar, R. (2013). El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO₂ y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Minga Ochoa, D., & Verdugo Navas, A. (2016). *Árboles y arbustos de los ríos de Cuenca*. Universidad del Azuay.
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Neri-Segura, F. J. (2002). *Division De Estudios De Posgrado Maestro En Ciencia Y Tecnología Ambiental Chihuahua , Chih* . Centro de investigación en materiales

avanzados división de estudios de posgrado.

- Olmo, M. (2016). Efectos del biochar sobre el suelo , las características de la raíz y la producción vegetal. In *Tesis*. Universidad de Córdoba.
- Palacios, G. (2016). *Caracterización química de la biomasa procedente de las hojas, pseudotallo, raquis y pseudopeciolo de la planta de banano y su relación con el poder calorífico*. 98. <https://doi.org/10.1002/adma.201704028>
- Parmar, A., Nema, P. K., & Agarwal, T. (2014). Biochar production from agro-food industry residues : a sustainable approach for soil and environmental management. *CURRENT SCIENCE*, 10, 1–10.
- Parra, P. A. C. (2016). Evaluación del uso de residuos orgánicos para la producción de biochar y su aplicación como enmienda orgánica. *IOSR Journal of Economics and Finance*, 3(1), 56. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>
- Pérez, L. (2016). *Valorización de residuos biomásicos de poda forestal de energía y medio ambiente*. Universidad de Oviedo.
- Perigó, Y., Pérez, O., Galán, Á., Antonioli, Z., Arévalo, R., Matos, Y., & Rosales, P. (2015). *Efecto de extractos acuosos de Helianthus annus Lin. sobre el crecimiento de Solanum lycopersicum Lin.* 36(4), 28–34.
- PLATICAR. (2018). *¿Cuáles son los beneficios del uso de biochar?* 3–4. <http://www.platicar.go.cr/preguntas-frecuentes/26-biochar/178-2-icuales-son-los-beneficios-del-uso-de-biochar>
- Puentestar, W. (2015). *“LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y EL DETERIORO DE LOS RECURSOS NATURALES EN EL ECUADOR. UNA PERSPECTIVA DESDE LA GEOGRAFÍA*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Rebolledo, A., López, G., Moreno, C., Collado, J., Alves, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2019). *Biocarbon (Biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil*. 1–16. <https://www.redalyc.org/html/573/57346617009/>
- RIMAY. (2004). Flora del Barranco de Cuenca. *Cooperación Para El Ambiente y La Cultura*, 1, 12. <http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/03FP08-0101-an-infC.pdf>
- Rojas, J., Gutiérrez, E., & Colina, G. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(4), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.005>
- Saint, J. (2013). *Carbon , Hydrogen , and Nitrogen in Coal*. https://www.leco.com/images/Products/elemental/628/628-SERIES_209-218.pdf
- Sánchez, F., Rebolledo, E., & Ramiro, E. (2000). *Hidroponia. Un Sistema de Producción de Plantas; Principios y Métodos de Cultivo*. 168. <http://acervo.siap.gob.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=5838#>
- Sánchez, J. (2014). *Schinus molle*. 388(1753), 2014. <https://www.arbolesornamentales.es/Schinus molle.pdf>
- Segura, C., Arteaga, E., & Diéguez, K. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *ResearchGate*, 1, 1–10.
- Segura, M. (2019). *Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta*. Tecnológico de Costa Rica.

- Soriano, C. (2011). *álamo blanco.pdf*.
http://www.lineaverdealcorcon.com/documentacion/espaciosverdeurbanos/documento_tecnico_1.pdf
- 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*. 1423–1435. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12435>
- Takolpuckdee, P. (2014). Transformation of Agricultural Market Waste Disposal to Biochar Soil Amendments. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.010>
- Tangri, N., & Wilson, M. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos : procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. *GAIA*, 1, 1–18.
- Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa (Aplicación a biomasa locales típicas)*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/31830/D-65781.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Trujillo, E. (2017). *Producción y caracterización de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Unda, S. B., Miguel, R., & Batista, G. (2018). *biocarbon (1)*. December. https://www.researchgate.net/publication/329659341_biocarbon_1
- Urien, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual* [Universidad Nacional de Educación a Distancia]. <https://core.ac.uk/download/pdf/36122518.pdf>
- Vignote, S. (2016). Procesos termoquímicos de la madera y en general de la biomasa. *ResearchGate*, November, 1–50.
- Wolfgang, K., Sonia, R., & Gómez, A. (2008). Producción de gas combustible a partir de biomasa en un horno rotatorio. *Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 3, 120.

ANEXOS

Anexo 1: Protocolo del Laboratorio de Energías Renovables, UNALM



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

CONDICIONES GENERALES:

1. Para la recepción de muestras se recomienda que cada una de las muestras (especies) cumpla con lo siguiente:
 - Representativa y homogénea, sin impurezas.
 - Muestra de 300 gramos de peso.
 - Partículas de 1" de longitud, muestras sólidas.
 - En bolsas de plástico (ziploc bags), muestras sólidas o botellas de plástico o vidrio, muestras líquidas.
2. Las recomendaciones para la recolección de muestras de residuos sólidos orgánicos son:
 - Si los residuos están en una única pila o montón, se debe hacer un cuarteo (estas pueden ir desde cuatro hasta diez). Cada una de las secciones se vuelve a someter a cuarteo tomando sub-muestras de la parte externa y del interior de la pila.
 - Las sub-muestras se guardan en bolsas plásticas de cierre hermético, se etiquetan registrando los datos de la persona que tomó la muestra, el tipo de muestra, la fecha de toma y el lugar donde se recolectó.
 - Las muestras se depositan en una cava con hielo y se trasladan al laboratorio en el menor tiempo posible para evitar variaciones en sus características.
3. La totalidad de los parámetros establecidos se rigen bajo las normas norteamericanas ASTM (American Society for Testing and Materials) de los comités técnicos de normalización, para muestras sólidas de material orgánico (carbón y coque).
4. Las muestras se miden normalmente como recibidos (Base húmeda). Si se aplica algún calor o tratamiento mecánico (Base seca) a la muestra antes de la prueba, este tratamiento se anotará en el **Reporte de Análisis de Caracterización de Biomasa** y tendría un precio adicional, el cual será el mismo del análisis solicitado.
5. Por cada Análisis se realiza 3 repeticiones y se determina la desviación standard, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos.
6. Forma de Pago:
 - Al contado: Depósito en cuenta o transferencia bancaria. Se requiere del pago por adelantado al 100%, para poder iniciar el análisis. Cuando el MONTO TOTAL por el servicio de análisis es mayor o igual a S/. 700.00 (Setecientos con 00/100 Nuevos Soles) se deposita sólo el 90% de éste al Banco.
 - Al contado: Depósito en cuenta de Detracción es aplicable sólo cuando el MONTO TOTAL por el servicio de análisis es mayor o igual a S/. 700.00 (Setecientos con 00/100 Nuevos Soles) se deposita sólo el 10% de éste al Banco.
 - El Cliente enviara al correo (erenovables@lamolina.edu.pe) el Boucher escaneado de los pagos realizados por el servicio de análisis.
7. El tiempo de entrega de resultados puede variar dependiendo del número de muestras y de la naturaleza de las mismas.
8. La solicitud de observación sobre los resultados deberá ser comunicado dentro del plazo de 7 días calendarios contados desde la fecha de entrega del Reporte de Análisis de Caracterización de Biomasa, la aceptación estará sujeta a evaluación por parte del Analista de la Unidad de Biomasa Energética. Vencido el plazo señalado se entenderá que el cliente quedó conforme con el Reporte de Análisis de Caracterización de Biomasa.



Anexo 2: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la primera semana

Nº Semana	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
Primera semana	Molle (M1)	Dosis I (D1)	1	0.4	0.6	0.4	0.7
			2	0.4	0.6	0.5	0.7
			3	0.6	0.7	0.4	0.4
			4	0.5	0.4	0.6	0.5
			5	0.6	0.7	0.5	0.7
			6	0.4	0.6	0.5	0.6
			7	0.6	0.6	0.7	0.4
			8	0.7	0.4	0.6	0.7
			9	0.6	0.6	0.5	0.5
			10	0.5	0.4	0.4	0.6
			11	0.6	0.5	0.6	0.7
			12	0.7	0.4	0.5	0.5
	Molle (M1)	Dosis II (D2)	1	0.6	0.6	0.7	0.6
			2	0.9	0.8	0.6	0.8
			3	0.6	0.6	0.8	0.7
			4	0.7	0.7	0.7	0.6
			5	0.7	0.6	0.7	0.8
			6	0.8	0.7	0.8	0.7
			7	0.8	0.7	0.6	0.7
			8	0.9	0.8	0.6	0.6
			9	0.6	0.7	0.8	0.9
			10	0.8	0.8	0.9	0.7
			11	0.7	0.9	0.7	0.5
			12	0.8	0.6	0.7	0.6
Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	1.0	1.0	0.8	
		2	0.8	1.0	0.8	1.0	
		3	1.1	0.8	1.0	1.1	
		4	0.8	1.0	1.1	0.9	
		5	1.0	0.9	0.9	0.8	
		6	1.0	0.8	0.9	1.0	
		7	0.8	0.8	1.0	1.0	
		8	0.9	1.1	1.1	1.1	
		9	1.1	0.9	0.8	0.9	
		10	0.8	0.8	1.0	0.8	
		11	0.9	1.0	0.8	1.0	
		12	1.0	0.8	1.1	0.8	
Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	1	1.2	1.4	1.4	1.4	
		2	1.1	1.4	1.4	1.4	
		3	1.2	1.5	1.2	1.6	
		4	1.2	1.2	1.4	1.2	
		5	1.3	1.2	1.4	1.4	
		6	1.2	1.4	1.2	1.3	
		7	1.4	1.2	1.4	1.4	
		8	1.2	1.4	1.5	1.4	
		9	1.4	1.2	1.4	1.2	
		10	1.2	1.4	1.4	1.2	
		11	1.5	1.2	1.2	1.5	
		12	1.6	1.4	1.4	1.2	
			1	0.5	0.3	0.3	0.3
			2	0.3	0.2	0.4	0.3

			3	0.4	0.2	0.2	0.5		
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	4	0.2	0.3	0.4	0.3		
			5	0.3	0.4	0.3	0.4		
			6	0.4	0.2	0.5	0.2		
			7	0.3	0.3	0.4	0.2		
			8	0.5	0.4	0.3	0.3		
			9	0.2	0.2	0.4	0.5		
			10	0.4	0.4	0.5	0.3		
			11	0.2	0.2	0.4	0.4		
			12	0.4	0.3	0.3	0.3		
					1	0.4	0.4	0.3	0.2
					2	0.4	0.3	0.4	0.4
					3	0.5	0.5	0.4	0.5
			4	0.3	0.3	0.5	0.3		
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.3	0.5	0.3	0.4		
			6	0.5	0.4	0.5	0.4		
			7	0.4	0.5	0.5	0.4		
			8	0.4	0.4	0.5	0.3		
			9	0.3	0.3	0.4	0.5		
			10	0.4	0.5	0.5	0.4		
			11	0.4	0.5	0.5	0.5		
			12	0.3	0.3	0.4	0.3		

Anexo 3: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la segunda semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
			1	0.6	0.7	0.6	0.7
			2	0.6	0.6	0.5	0.5
			3	0.7	0.5	0.4	0.6
			4	0.5	0.6	0.4	0.7
			5	0.4	0.5	0.7	0.6
	Molle (M1)	Dosis I (D1)	6	0.6	0.6	0.7	0.4
			7	0.5	0.4	0.6	0.6
			8	0.7	0.4	0.6	0.5
			9	0.4	0.4	0.5	0.5
			10	0.6	0.4	0.6	0.4
			11	0.7	0.5	0.8	0.5
			12	0.5	0.6	0.7	0.5
					1	0.6	0.6
			2	0.6	0.9	0.6	0.6
			3	0.8	0.8	0.7	0.7
			4	0.7	0.8	0.9	0.6
	Molle (M1)	Dosis II (D2)	5	0.8	0.6	0.6	0.7
			6	0.6	0.9	0.8	0.7
			7	0.7	0.7	0.7	0.7
			8	0.6	0.4	0.8	0.6
			9	0.6	0.7	0.6	0.9
			10	0.7	0.8	0.7	0.7
			11	0.7	0.6	0.8	0.6
			12	0.8	0.6	0.9	0.9
	Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	0.8	1.0	1.0	1.0
			2	1.0	0.8	1.0	1.0
			3	0.9	1.0	1.0	0.9

Segunda semana			4	1.0	1.0	0.9	1.1
			5	0.8	0.8	1.1	1
			6	1.0	1.0	0.9	0.8
			7	1.0	0.7	1.0	1.0
			8	1.1	0.9	0.9	0.9
			9	1.1	1.1	1.0	0.8
			10	1.0	0.8	0.8	1.0
			11	0.9	1.0	1.2	1.1
			12	0.8	1.1	0.9	1
			1	1.6	1.2	1.6	1.2
			2	1.5	1.3	1.4	1.4
			3	1.6	1.2	1.4	1.2
		4	1.3	1.6	1.4	1.5	
	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	5	1.3	1.6	1.6	1.6
			6	1.4	1.6	1.6	1.5
			7	1.4	1.6	1.6	1.6
			8	1.3	1.4	1.3	1.4
			9	1.5	1.4	1.2	1.6
			10	1.5	1.6	1.4	1.4
			11	1.5	1.4	1.6	1.3
			12	1.4	1.3	1.6	1.8
			1	0.2	0.5	0.5	0.2
			2	0.4	0.3	0.5	0.4
			3	0.4	0.3	0.2	0.4
			4	0.4	0.4	0.4	0.3
			5	0.4	0.4	0.3	0.4
			6	0.4	0.4	0.4	0.3
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	7	0.2	0.3	0.4	0.5
			8	0.2	0.4	0.3	0.5
			9	0.5	0.4	0.3	0.4
			10	0.4	0.4	0.3	0.4
			11	0.3	0.3	0.3	0.2
			12	0.2	0.2	0.2	0.4
			1	0.3	0.4	0.5	0.4
			2	0.3	0.3	0.4	0.3
			3	0.5	0.2	0.2	0.5
			4	0.4	0.3	0.5	0.3
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.3	0.5	0.3	0.4
			6	0.2	0.5	0.5	0.3
			7	0.3	0.4	0.2	0.3
			8	0.4	0.2	0.3	0.4
			9	0.5	0.5	0.4	0.5
			10	0.4	0.5	0.5	0.4
			11	0.2	0.4	0.5	0.2
			12	0.3	0.3	0.3	0.3

Anexo 4: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la tercera semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
Tercera semana	Molle (M1)	Dosis I (D1)	1	0.6	0.5	0.4	0.6
			2	0.5	0.5	0.5	0.6
			3	0.4	0.4	0.5	0.4
			4	0.5	0.4	0.5	0.5
			5	0.4	0.5	0.6	0.5
			6	0.4	0.4	0.6	0.4
			7	0.5	0.5	0.7	0.4
			8	0.5	0.6	0.6	0.6
			9	0.4	0.5	0.5	0.7
			10	0.5	0.4	0.4	0.6
			11	0.5	0.5	0.4	0.6
			12	0.7	0.4	0.5	0.5
	Molle (M1)	Dosis II (D2)	1	0.8	0.8	0.6	0.6
			2	0.7	0.7	0.8	0.6
			3	0.6	0.8	0.8	0.8
			4	0.8	0.7	0.6	0.8
			5	0.8	0.9	0.7	0.7
			6	0.6	0.6	0.8	0.6
			7	0.7	0.6	0.7	0.9
			8	0.7	0.6	0.6	0.8
			9	0.6	0.8	0.8	0.6
			10	0.7	0.6	0.9	0.6
			11	0.9	0.9	0.8	0.7
			12	0.8	0.8	0.6	0.7
Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	1.0	0.8	0.8	
		2	1.0	1.0	1.0	0.8	
		3	0.8	0.8	0.8	1.0	
		4	0.8	0.8	1.0	1.0	
		5	0.9	1.1	0.8	1.1	
		6	1.0	1.0	1.1	1.0	
		7	0.8	1.0	0.8	1.0	
		8	0.9	0.	1.0	0.8	
		9	0.9	1.0	1.1	1.1	
		10	0.8	1.1	1.1	0.8	
		11	1.0	1.0	1.0	0.9	
		12	1.1	1.1	1.0	1.0	
Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	1	1.4	1.6	1.0	1.1	
		2	1.5	1.5	1.0	1.2	
		3	1.2	1.3	1.2	1.2	
		4	1.6	1.2	1.2	1.5	
		5	1.4	1.7	1.0	1.0	
		6	1.7	1.0	1.7	1.4	
		7	1.2	1.0	1.2	1.1	
		8	1.7	1.5	1.0	1.7	
		9	1.3	1.4	1.7	1.5	
		10	1.3	1.5	1.0	1.2	
		11	1.5	1.6	1.7	1.6	
		12	1.4	1.3	1.0	1.4	
			1	0.3	0.2	0.2	0.2
			2	0.3	0.3	0.1	0.2

			3	0.3	0.1	0.1	0.3		
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	4	0.2	0.2	0.1	0.3		
			5	0.2	0.3	0.2	0.2		
			6	0.3	0.3	0.3	0.3		
			7	0.3	0.2	0.2	0.1		
			8	0.2	0.2	0.2	0.1		
			9	0.2	0.1	0.3	0.2		
			10	0.3	0.3	0.3	0.2		
			11	0.3	0.2	0.3	0.3		
			12	0.4	0.1	0.3	0.2		
					1	0.5	0.5	0.4	0.4
					2	0.5	0.5	0.4	0.5
					3	0.4	0.4	0.3	0.4
			4	0.3	0.5	0.2	0.4		
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.4	0.4	0.4	0.5		
			6	0.5	0.4	0.2	0.3		
			7	0.3	0.3	0.5	0.5		
			8	0.4	0.5	0.3	0.5		
			9	0.2	0.2	0.4	0.3		
			10	0.4	0.4	0.4	0.4		
			11	0.4	0.3	0.5	0.5		
			12	0.3	0.2	0.3	0.4		

Anexo 5: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la cuarta semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones				
				I	II	III	IV	
			1	0.4	0.6	0.4	0.4	
			2	0.5	0.4	0.5	0.7	
			3	0.6	0.6	0.7	0.4	
			4	0.5	0.6	0.7	0.5	
			5	0.4	0.4	0.5	0.4	
	Molle (M1)	Dosis I (D1)	6	0.4	0.4	0.6	0.4	
			7	0.5	0.5	0.4	0.5	
			8	0.4	0.4	0.4	0.4	
			9	0.4	0.6	0.5	0.5	
			10	0.6	0.5	0.6	0.4	
			11	0.4	0.6	0.5	0.6	
			12	0.5	0.5	0.6	0.7	
					1	0.6	0.6	0.6
Cuarta semana			2	0.7	0.6	0.8	0.7	
			3	0.6	0.7	0.7	0.8	
			4	0.7	0.6	0.8	0.6	
			5	0.7	0.7	0.7	0.6	
		Molle (M1)	Dosis II (D2)	6	0.6	0.8	0.6	0.7
				7	0.9	0.7	0.6	0.7
				8	0.6	0.6	0.7	0.6
				9	0.7	0.7	0.6	0.6
				10	0.8	0.5	0.9	0.7
				11	0.7	0.6	0.7	0.9
				12	0.6	0.7	0.6	0.8
				Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	1.0

			2	1.0	1.0	0.8	0.8
			3	0.8	1.1	1.1	1.1
			4	1.1	0.8	0.8	0.8
			5	1.1	0.8	1.0	1.1
			6	0.8	1.1	0.8	0.8
			7	1.0	0.9	0.8	1.0
			8	0.9	1.0	1.0	1.0
			9	1.1	0.8	1.0	1.0
			10	0.9	1.0	0.9	0.8
			11	0.8	0.8	1.0	0.8
			12	1.1	0.8	1.1	0.7
			1	1.4	1.4	1.2	1.2
			2	1.2	1.2	0.9	1.0
			3	1.6	1.2	1.2	1.2
			4	1.1	1.6	1.2	1.4
	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	5	1.2	1.3	1.4	1.2
			6	1.4	1.6	1.1	1.2
			7	1.4	1.6	1.3	1.1
			8	1.6	1.1	1.0	1.2
			9	1.4	1.4	1.3	1.2
			10	1.4	1.2	1.2	1.4
			11	1.5	1.4	1.3	1.1
			12	1.4	1.4	1.2	1.3
			1	0.2	0.3	0.2	0.3
			2	0.2	0.2	0.2	0.3
			3	0.2	0.3	0.3	0.2
			4	0.1	0.4	0.2	0.3
			5	0.2	0.4	0.3	0.2
			6	0.1	0.3	0.3	0.3
			7	0.1	0.2	0.2	0.2
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	8	0.2	0.2	0.3	0.3
			9	0.2	0.3	0.3	0.3
			10	0.1	0.2	0.2	0.2
			11	0.2	0.2	0.3	0.3
			12	0.2	0.2	0.2	0.2
			1	0.2	0.3	0.2	0.3
			2	0.4	0.2	0.2	0.3
			3	0.3	0.3	0.3	0.2
			4	0.2	0.4	0.2	0.4
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.3	0.4	0.3	0.2
			6	0.4	0.3	0.4	0.4
			7	0.2	0.2	0.3	0.2
			8	0.2	0.3	0.3	0.2
			9	0.3	0.3	0.3	0.3
			10	0.4	0.2	0.2	0.2
			11	0.4	0.2	0.3	0.3
			12	0.3	0.2	0.1	0.3

Anexo 6: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la quinta semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
Quinta semana	Molle (M1)	Dosis I (D1)	1	0.6	0.6	0.6	0.6
			2	0.5	0.7	0.5	0.5
			3	0.7	0.6	0.6	0.6
			4	0.5	0.5	0.6	0.6
			5	0.7	0.6	0.5	0.5
			6	0.7	0.5	0.6	0.6
			7	0.5	0.5	0.6	0.7
			8	0.5	0.7	0.6	0.6
			9	0.7	0.7	0.5	0.6
			10	0.6	0.5	0.6	0.5
			11	0.6	0.7	0.7	0.6
			12	0.6	0.6	0.5	0.6
	Molle (M1)	Dosis II (D2)	1	0.6	0.8	0.8	0.6
			2	0.6	0.6	0.7	0.7
			3	0.7	0.8	0.7	0.8
			4	0.6	0.7	0.6	0.6
			5	0.7	0.7	0.7	0.7
			6	0.6	0.6	0.6	0.7
			7	0.7	0.7	0.8	0.6
			8	0.7	0.6	0.7	0.8
			9	0.8	0.7	0.7	0.7
			10	0.6	0.7	0.6	0.7
			11	0.7	0.8	0.7	0.7
			12	0.6	0.7	0.7	0.7
	Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	0.8	0.7	1.0
			2	0.9	1.0	0.9	0.8
			3	0.8	0.9	1.1	0.9
			4	0.8	1.0	1.0	1.0
			5	1.0	1.0	1.0	0.8
			6	0.8	0.9	1.0	0.9
			7	0.9	1.0	1.0	0.8
			8	0.8	0.8	1.0	1.4
			9	0.6	1.1	1.1	1.0
			10	1.0	1.0	1.0	1.1
			11	0.9	0.8	0.8	0.7
			12	0.8	0.9	0.9	1.1
	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	1	1.0	1.0	1.2	1.5
			2	1.6	1.2	1.3	1.6
			3	1.5	1.0	1.4	1.5
			4	1.6	1.0	1.2	1.1
			5	1.2	1.2	1.3	1.3
			6	1.1	1.0	1.2	1.4
			7	1.0	1.3	1.1	1.4
			8	1.0	1.5	1.6	1.0
			9	1.2	1.3	1.1	1.3
			10	1.3	1.0	1.4	1.4
			11	1.4	1.1	1.4	1.0
			12	1.3	1.1	1.5	1.0
			1	0.3	0.2	0.3	0.2
			2	0.3	0.2	0.4	0.2

			3	0.3	0.3	0.3	0.1		
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	4	0.1	0.3	0.3	0.3		
			5	0.2	0.2	0.3	0.1		
			6	0.3	0.3	0.2	0.1		
			7	0.2	0.2	0.1	0.1		
			8	0.2	0.3	0.3	0.2		
			9	0.2	0.3	0.1	0.1		
			10	0.1	0.3	0.2	0.1		
			11	0.2	0.4	0.3	0.2		
			12	0.3	0.4	0.3	0.3		
					1	0.3	0.2	0.3	0.3
					2	0.3	0.2	0.4	0.3
					3	0.3	0.3	0.3	0.4
			4	0.3	0.3	0.3	0.3		
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.2	0.2	0.3	0.3		
			6	0.4	0.3	0.4	0.3		
			7	0.2	0.2	0.1	0.2		
			8	0.2	0.3	0.3	0.3		
			9	0.2	0.3	0.1	0.2		
			10	0.3	0.3	0.2	0.2		
			11	0.2	0.4	0.3	0.2		
			12	0.3	0.4	0.3	0.3		

Anexo 7: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la sexta semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
			1	0.6	0.5	0.6	0.7
			2	0.5	0.6	0.5	0.4
			3	0.4	0.4	0.6	0.6
			4	0.5	0.5	0.6	0.7
			5	0.7	0.6	0.6	0.5
	Molle (M1)	Dosis I (D1)	6	0.7	0.7	0.5	0.4
			7	0.4	0.3	0.5	0.7
			8	0.7	0.5	0.6	0.4
			9	0.5	0.6	0.5	0.6
			10	0.4	0.8	0.3	0.7
			11	0.6	0.4	0.5	0.5
			12	0.5	0.5	0.6	0.7
					1	0.7	0.8
			2	0.6	0.7	0.6	0.9
			3	0.8	0.7	0.7	0.9
			4	0.8	0.9	0.6	0.8
	Molle (M1)	Dosis II (D2)	5	0.6	0.8	0.9	0.8
			6	0.9	0.9	0.7	0.7
			7	0.7	0.9	0.6	0.9
			8	0.6	0.7	0.8	0.8
			9	0.6	0.6	0.7	0.7
			10	0.7	0.7	0.6	0.8
			11	0.8	0.8	0.9	0.6
			12	0.6	0.6	0.9	0.79
Sexta semana	Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	1.0	1.0	1	1.1
			2	0.6	0.8	0.9	0.9
			3	0.8	1.0	0.8	1.0

			4	0.8	0.9	0.8	0.8
			5	1.0	0.8	1.0	0.7
			6	1.0	1.1	1.0	0.9
			7	1.0	1.0	1.1	1.0
			8	1.1	0.8	0.8	0.8
			9	1.0	0.9	1.0	1.0
			10	0.8	1.1	0.8	0.8
			11	1.0	0.8	1.0	1.0
			12	0.8	0.8	1.0	0.8
			1	1.4	1.4	1.2	1.4
			2	1.4	1.2	1.4	1.1
			3	1.4	1.3	1.1	1.3
			4	1.1	1.4	1.3	1.5
	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	5	1.3	1.0	1.1	1.0
			6	1.2	1.4	1.2	1.2
			7	1.5	1.0	1.2	1.2
			8	1.0	1.0	1.4	1.1
			9	1.3	1.0	1.0	1.2
			10	1.1	1.5	1.1	1.1
			11	1.1	1.0	1.2	1.1
			12	1.3	1.4	1.3	1.3
			1	0.2	0.2	0.3	0.2
			2	0.1	0.2	0.2	0.2
			3	0.2	0.4	0.3	0.2
			4	0.4	0.4	0.1	0.1
			5	0.1	0.3	0.2	0.2
			6	0.3	0.3	0.1	0.3
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	7	0.4	0.4	0.2	0.2
			8	0.2	0.2	0.3	0.1
			9	0.2	0.2	0.3	0.3
			10	0.3	0.4	0.1	0.3
			11	0.1	0.2	0.1	0.2
			12	0.3	0.4	0.2	0.3
			1	0.3	0.2	0.3	0.2
			2	0.3	0.2	0.2	0.2
			3	0.2	0.4	0.3	0.2
			4	0.3	0.4	0.3	0.3
	Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.2	0.3	0.4	0.2
			6	0.3	0.3	0.2	0.3
			7	0.4	0.4	0.2	0.2
			8	0.2	0.2	0.3	0.3
			9	0.2	0.2	0.3	0.2
			10	0.3	0.4	0.3	0.4
			11	0.2	0.2	0.2	0.3
			12	0.2	0.4	0.2	0.4

Anexo 8: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la séptima semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
	Molle (M1)	Dosis I (D1)	1	0.5	0.5	0.6	0.6
2			0.6	0.4	0.5	0.4	
3			0.6	0.4	0.6	0.5	

			4	0.5	0.5	0.6	0.5
			5	0.5	0.5	0.6	0.6
			6	0.6	0.6	0.5	0.5
			7	0.6	0.6	0.5	0.5
			8	0.5	0.5	0.6	0.6
			9	0.6	0.4	0.5	0.6
			10	0.6	0.6	0.3	0.6
			11	0.6	0.5	0.5	0.5
			12	0.5	0.5	0.6	0.7
Séptima semana	Molle (M1)	Dosis II (D2)	1	0.7	0.8	0.7	0.8
			2	0.9	0.7	0.9	0.7
			3	0.9	0.8	0.9	0.6
			4	0.9	0.8	0.8	1.0
			5	1.0	0.7	0.9	0.7
			6	0.9	0.8	0.9	0.8
			7	0.8	0.7	0.8	0.8
			8	0.9	0.9	0.8	0.7
			9	1.0	0.8	0.8	0.9
			10	1.0	0.9	0.9	0.9
			11	0.5	0.8	0.8	0.6
			12	0.9	0.9	0.9	0.9
	Álamo blanco (M2)	Dosis I (D1)	1	0.8	0.8	1.0	1.1
			2	0.7	1.1	1.0	1.1
			3	1.1	0.8	0.8	1.0
			4	1.1	1.0	1.1	1.1
			5	1.0	0.8	0.8	1.0
			6	1.0	1.1	0.9	1.1
			7	1.0	0.9	0.8	0.8
			8	0.8	1.1	1.1	1.1
			9	1.0	0.9	1.0	1.0
			10	0.9	0.8	1.1	0.9
			11	1.0	1.1	1.0	1.0
			12	0.8	1.0	1.1	1.1
	Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	1	1.3	1.5	1.4	1.2
			2	1.7	1.4	1.6	1.5
			3	1.0	1.8	1.3	1.5
			4	1.1	1.5	1.3	1.6
			5	1.1	1.0	1.4	1.5
			6	1.5	1.5	1.4	1.5
			7	1.4	1.1	1.2	1.2
			8	1.2	1.3	1.5	1.7
			9	1.3	1.3	1.5	1.6
			10	1.2	1.3	1.5	1.4
			11	1.1	1.3	1.0	1.3
			12	1.3	1.4	1.5	1.3
	Testigo (T1)	Dosis I (D1)	1	0.2	0.3	0.2	0.3
			2	0.2	0.2	0.3	0.3
			3	0.2	0.2	0.3	0.3
			4	0.3	0.2	0.2	0.1
			5	0.2	0.2	0.3	0.4
			6	0.4	0.2	0.1	0.2
			7	0.4	0.2	0.2	0.2
			8	0.3	0.3	0.3	0.2
			9	0.3	0.3	0.2	0.3
			10	0.2	0.2	0.3	0.1

			11	0.4	0.3	0.2	0.1
			12	0.2	0.2	0.2	0.2
			1	0.2	0.3	0.2	0.2
			2	0.2	0.3	0.3	0.3
			3	0.2	0.4	0.3	0.3
			4	0.2	0.2	0.3	0.2
	Testigo	Dosis II	5	0.3	0.3	0.4	0.4
	(T2)	(D2)	6	0.2	0.3	0.3	0.3
			7	0.4	0.2	0.2	0.2
			8	0.3	0.3	0.3	0.3
			9	0.3	0.3	0.2	0.2
			10	0.2	0.2	0.2	0.3
			11	0.3	0.2	0.3	0.4
			12	0.3	0.3	0.2	0.2

Anexo 9: Tasa de crecimiento de las plántulas (cm) de *Helianthus annuus* en la octava semana

Fecha	Tipo de Biocarbón	Tipo de dosis	Número de semillas germinadas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
			1	0.5	0.5	0.6	0.7
			2	0.4	0.6	0.5	0.6
			3	0.5	0.6	0.6	0.5
			4	0.7	0.7	0.5	0.6
			5	0.6	0.6	0.6	0.6
	Molle	Dosis I	6	0.6	0.5	0.4	0.7
	(M1)	(D1)	7	0.4	0.6	0.5	0.7
			8	0.5	0.5	0.5	0.4
			9	0.6	0.4	0.5	0.5
			10	0.5	0.6	0.6	0.6
			11	0.4	0.7	0.5	0.6
			12	0.5	0.5	0.5	0.5
			1	0.8	0.8	0.9	0.7
			2	0.7	0.7	0.8	0.8
			3	0.6	0.9	0.7	0.7
			4	0.8	0.8	0.8	1.0
	Molle	Dosis II	5	0.7	0.8	0.8	0.8
	(M1)	(D2)	6	0.8	0.9	0.9	0.6
			7	0.9	0.7	0.8	0.9
			8	0.7	0.9	0.8	0.8
			9	0.8	0.9	0.8	0.9
			10	0.9	0.8	0.9	0.8
			11	0.8	0.9	0.9	0.7
			12	0.9	0.8	0.7	0.8
Octava semana			1	1.1	1.0	1.0	1.1
			2	1.0	1.1	1.1	1.0
			3	1.1	1.1	1.0	0.8
			4	1.0	1.0	0.8	1.1
	Álamo blanco	Dosis I	5	1.1	0.8	1.0	1.0
	(M2)	(D1)	6	1.0	1.0	0.9	1.0
			7	1.0	0.9	0.9	0.8
			8	0.9	1.1	0.9	1.1
			9	1.0	1.1	1.0	0.8
			10	0.8	1.0	1.0	1.0
			11	1.1	0.9	0.8	0.9

		12	0.8	1.0	1.1	1.1
		1	1.7	1.5	1.6	1.6
		2	1.6	1.6	1.8	1.6
		3	1.5	1.5	1.7	1.8
		4	1.7	1.7	1.5	1.2
Álamo blanco (M2)	Dosis II (D2)	5	1.4	1.6	1.8	1.5
		6	1.5	1.5	1.8	1.2
		7	1.7	1.4	1.5	1.8
		8	1.5	1.4	1.7	1.3
		9	1.4	1.5	1.6	1.6
		10	1.6	1.6	1.5	1.6
		11	1.1	1.5	1.0	1.7
		12	1.0	1.7	1.7	1.4
		1	0.3	0.3	0.1	0.3
		2	0.4	0.2	0.2	0.2
		3	0.3	0.4	0.2	0.1
		4	0.3	0.2	0.2	0.3
		5	0.4	0.4	0.1	0.3
		6	0.3	0.4	0.3	0.3
Testigo (T1)	Dosis I (D1)	7	0.3	0.2	0.1	0.3
		8	0.2	0.2	0.2	0.3
		9	0.3	0.2	0.1	0.2
		10	0.4	0.2	0.3	0.4
		11	0.1	0.2	0.2	0.3
		12	0.2	0.2	0.3	0.3
		1	0.2	0.4	0.2	0.2
		2	0.3	0.2	0.4	0.3
		3	0.4	0.1	0.4	0.3
		4	0.3	0.2	0.2	0.2
Testigo (T2)	Dosis II (D2)	5	0.2	0.2	0.2	0.2
		6	0.3	0.1	0.2	0.4
		7	0.3	0.2	0.2	0.2
		8	0.3	0.3	0.2	0.3
		9	0.3	0.3	0.3	0.3
		10	0.3	0.2	0.2	0.2
		11	0.2	0.2	0.2	0.2
		12	0.3	0.2	0.2	0.2

PERMISO DEL AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN PARA SUBIR AL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Jennifer Gabriela Medina Pinos portador(a) de la cédula de ciudadanía 0105410518. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Caracterización de biomasa residual de la poda de árboles del cantón Cuenca mediante el análisis TGA, elemental y poder calórico para la producción de biochar” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo; autorizo a la universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Cuenca, 17 de Julio de 2020



Jennifer Gabriela Medina Pinos
C.I.:0105410518