



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA**

**INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**CHARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE BIOCHAR**

**PRODUCIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS A**

**PARTIR DE LOS RESIDUOS DE CIPRÉS Y QUINUAL EN**

**EL CANTÓN CAÑAR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN**

**CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTOR: TANNYA FERNANDA GANZHI MAURIZACA**

**DIRECTOR: ING. MANUEL ALVAREZ -VERA PH.D.**

**CUENCA – ECUADOR**

**2020**

*Yo 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 QUÍMICA DE BIOCHAR PRODUCIDO A  
DIFERENTES TEMPERATURAS A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE  
CIPRÉS Y QUINUAL EN EL CANTÓN CAÑAR**

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

**AUTOR: TANNYA FERNANDA GANZHI MAURIZACA**

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

**CUENCA - ECUADOR**

**2020**

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

## DECLARACIÓN

Yo, Tannya Fernanda Ganzhi Maurizaca, 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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Tannya Ganzhi M.', is centered on a light yellow rectangular background.

---

**Tannya Fernanda Ganzhi Maurizaca**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Manuel Alvarez-Vera', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat illegible due to the cursive style.

**Ing. Manuel Alvarez-Vera., Ph.D.**

**DIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy infinitas gracias a mi asesor de tesis el Ing. Manuel Alvarez-Vera Ph.D, al Ing. Diego Heras; quienes me brindaron su amistad, me guiaron y orientaron en la presente investigación, y por trasmitirme sus conocimientos durante mi formación profesional. A la Universidad Agraria la Molina de Lima- Perú, Laboratorios de Energía Renovable a cargo del Doctor José Calle Ph.D, Al departamento de Internalización de la Universidad Católica de Cuenca, Lcda. Andrea Vallejo, por su contribución y apoyo en la ejecución de la presente investigación.

## **DEDICATORIA**

A Dios dueño de mi triunfo, por guiarme en el trayecto de mi vida; por enseñarme que nada en la vida es gratis, que todo lo que uno se propone se cumple con esfuerzo.

A mis padres por su respaldo incondicional; a mis hermanos y hermanas por su comprensión, apoyo, sacrificio, paciencia, y por la confianza que depositaron en mí, ya que ellos fueron los pilares fundamentales que permitieron realizar de este sueño una realidad.

A todos mis amigos incondicionales que de una u otra forma me han acompañado en este gran reto personal.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	iii
CERTIFICACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS.....	xiv
LISTA DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
CAPÍTULO I.....	- 1 -
1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
CAPÍTULO II.....	- 5 -
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	- 5 -
2.1 Biomasa.....	- 5 -
2.1.1 Definición.....	- 5 -
2.1.2 Necromasa.....	- 5 -
2.1.3 Tipos.....	- 6 -
2.1.4 Importancia.....	- 6 -
2.2 Aprovechamiento de la biomasa.....	- 7 -
2.2.1 Podas forestales del cantón Cañar.....	- 7 -
2.2.2 Biomasa residual para el estudio.....	- 7 -
2.3 Biochar.....	- 11 -
2.3.1 Definición.....	- 11 -
2.3.2 Composición Química.....	- 11 -
2.3.3 Beneficios ambientales del biochar.....	- 12 -
2.4 Métodos de transformación de la biomasa.....	- 13 -
2.4.1 Torrefacción.....	- 13 -
2.4.2 Pirólisis lenta.....	- 15 -
2.4.3 Pirólisis rápida.....	- 15 -
2.5 Caracterización química del biochar.....	- 15 -
2.5.1 Análisis Elemental CHONS.....	- 15 -
2.5.2 Análisis termogravimétrico TGA.....	- 17 -
2.5.3 Análisis Poder Calórico.....	- 19 -
2.6 Germinación de Semillas.....	- 19 -

2.7	Evaluación de biochar en la germinación de trigo ( <i>Triticum vulgare</i> ).....	20 -
2.7.1	Hábito, crecimiento y desarrollo.....	20 -
CAPÍTULO III.....		22 -
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	22 -
3.1	Área de estudio .....	22 -
3.1	Población y muestra .....	24 -
3.1.1	Población.....	24 -
3.1.2	Sustratos .....	26 -
3.2	Materiales y equipos.....	26 -
3.2.1	Materiales para la recolección de biomasa. ....	26 -
3.2.2	Materiales para el acondicionamiento de las muestras.....	27 -
3.2.3	Materiales para la caracterización química en la biomasa. ....	27 -
3.2.4	Materiales y equipos para la caracterización química del oxígeno total.....	27 -
3.2.5	Materiales para la caracterización química del azufre.....	28 -
3.2.6	Materiales para el análisis termogravimétrico. ....	28 -
3.2.7	Materiales para la germinación de las plantas de trigo. ....	28 -
3.3	Desarrollo Metodológico .....	29 -
3.3.1	Diseño Experimental.....	29 -
3.4	Metodología para la caracterización química de la biomasa.....	31 -
3.4.1	Recolección y acondicionamiento de la biomasa residual.....	31 -
3.4.2	Preparación de muestras para laboratorio. ....	32 -
3.4.3	Análisis CHN, determinación del carbono (C), hidrógeno (H) Totales y nitrógeno (N).....	32 -
3.4.4	Determinación de oxígeno total. ....	33 -
3.4.5	Determinación del contenido de Azufre. ....	34 -
3.4.6	Análisis termogravimétrico (humedad y contenido de materia volátil).- 36 -	
3.4.7	Análisis de poder calórico superior. ....	36 -
3.5	Relación C/N .....	38 -
3.6	Producción de Biochar por el método de Torrefacción.....	38 -
3.6.1	Cálculo del rendimiento del biochar. ....	41 -
3.7	Caracterización química del biochar .....	42 -
3.8	Metodología para la germinación de las semillas de trigo.....	42 -
3.9	Análisis Estadístico.....	49 -
CAPITULO IV .....		50 -

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	- 50 -
4.1	Caracterización química en la biomasa residual .....	- 50 -
4.1.1	Carbono total.....	- 51 -
4.1.2	Hidrógeno total. ....	- 52 -
4.1.3	Oxígeno total. ....	- 53 -
4.1.4	Nitrógeno.....	- 54 -
4.1.5	Azufre.....	- 56 -
4.2	Relación C/N en la biomasa residual .....	- 57 -
4.3	Análisis termogravimétrico en la biomasa .....	- 57 -
4.3.1	Humedad.....	- 57 -
4.3.2	Material volátil.....	- 60 -
4.4	Elaboración de biochar por el método de torrefacción .....	- 62 -
4.5	Análisis químico del biochar .....	- 67 -
4.5.1	Carbono total.....	- 68 -
4.5.2	Hidrógeno total. ....	- 72 -
4.5.3	Oxígeno total. ....	- 76 -
4.5.4	Nitrógeno.....	- 79 -
4.5.5	Azufre.....	- 83 -
4.6	Análisis de humedad y material volátil del biochar .....	- 87 -
4.6.1	Humedad.....	- 87 -
4.6.2	Materia Volátil.....	- 91 -
4.7	Contenido de poder calórico en el biochar a partir de ciprés y quinual.....	- 95 -
4.8	Evaluación de biochar en la germinación de semillas de trigo ( <i>Triticum vulgare</i> ).....	- 99 -
4.8.1	Hábito, crecimiento y desarrollo.....	- 99 -
4.8.2	Biochar como aditivo para la germinación de trigo.....	- 100 -
	CAPITULO V .....	- 110 -
5.	CONCLUSIONES .....	- 110 -
	CAPITULO VI .....	- 112 -
6.	RECOMENDACIONES.....	- 112 -
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 113 -
	ANEXOS.....	- 118 -

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Especie quinal ( <i>Polylepis racemosa</i> ).....	- 8 -
<b>Figura 2:</b> Especie ciprés ( <i>Cupressus macrocarpa</i> ).....	- 10 -
<b>Figura 3:</b> Métodos de transformación de la biomasa.....	- 13 -
<b>Figura 4:</b> Método de Torrefacción .....	- 14 -
<b>Figura 5:</b> Equipo para el análisis elemental.....	- 16 -
<b>Figura 6:</b> Analizador termogravimétrico.....	- 18 -
<b>Figura 7:</b> Bomba calorimétrica de Emerson para la medición de poder calórico.....	- 19 -
<b>Figura 8:</b> Germinación de semillas de trigo .....	- 20 -
<b>Figura 9:</b> Zona de estudio para la recolección de biomasa residual .....	- 23 -
<b>Figura 10:</b> Delimitación del parque San Antonio .....	- 24 -
<b>Figura 11:</b> Parque Guantug.....	- 25 -
<b>Figura 12:</b> Delimitación del parque central Simón Bolívar .....	- 26 -
<b>Figura 13:</b> Diseño experimental para la caracterización química de la biomasa y biochar .....	- 30 -
<b>Figura 14:</b> Desarrollo metodológico para la producción de biochar .....	- 30 -
<b>Figura 15:</b> Desarrollo metodológico para la germinación de semillas .....	- 31 -
<b>Figura 16:</b> Biomasa residual de ciprés (A) y quinal (B).....	- 32 -
<b>Figura 17:</b> Limaduras de ciprés (A) y quinal (B) .....	- 32 -
<b>Figura 18:</b> Balanza analítica para el pesaje de la muestra .....	- 33 -
<b>Figura 19:</b> Módulo para el análisis del contenido de oxígeno .....	- 33 -
<b>Figura 20:</b> Micro balanza para pesar la muestra de biomasa o biochar .....	- 34 -
<b>Figura 21:</b> Colocación de las muestras para iniciar con el análisis.....	- 34 -
<b>Figura 22:</b> Pesaje de la muestra para el análisis de Azufre.....	- 35 -
<b>Figura 23:</b> Preparación de muestras de biochar.....	- 35 -
<b>Figura 24:</b> Puerta del horno para el análisis de azufre .....	- 35 -
<b>Figura 25:</b> Peso de la muestra para el análisis de poder calórico.....	- 36 -
<b>Figura 26:</b> Colocación de la muestra en la estación de trabajo .....	- 37 -
<b>Figura 27:</b> Bomba calorimétrica para análisis de poder calórico .....	- 37 -
<b>Figura 28:</b> Módulo de poder calórico.....	- 38 -
<b>Figura 29:</b> Horno Termogravimétrico para la producción de biochar .....	- 38 -
<b>Figura 30:</b> Colocación de las muestras de biomasa en el horno .....	- 39 -
<b>Figura 31:</b> Horno termogravimétrico para el análisis de humedad y producción de biochar.....	- 41 -
<b>Figura 32:</b> Bandeja para la germinación de semillas de trigo .....	- 43 -
<b>Figura 33:</b> Preparación de las diluciones 1:10.....	- 44 -

<b>Figura 34:</b> Tratamiento del biochar de ciprés (T1M1).....	- 44 -
<b>Figura 35:</b> Tratamiento del biochar de ciprés (T2M1).....	- 45 -
<b>Figura 36:</b> Tratamiento del biochar de ciprés (T3M1).....	- 45 -
<b>Figura 37:</b> Tratamientos del biochar de quinal (T4M2) .....	- 45 -
<b>Figura 38:</b> Tratamientos del biochar de quinal (T5M2) .....	- 46 -
<b>Figura 39:</b> Tratamientos del biochar de quinal (T6M2) .....	- 46 -
<b>Figura 40:</b> Testigo para las pruebas de germinación.....	- 47 -
<b>Figura 41:</b> Medición de la raíz de la plántula de trigo .....	- 47 -
<b>Figura 42:</b> Medición del tallo de la plántula de trigo.....	- 47 -
<b>Figura 43:</b> Contenido de carbono en la biomasa de ciprés y quinal .....	- 51 -
<b>Figura 44:</b> Error Estándar del Contenido de Carbono en la biomasa residual Ciprés y Quinal .....	- 52 -
<b>Figura 45:</b> Porcentaje de hidrógeno en las especies ciprés y quinal .....	- 53 -
<b>Figura 46:</b> Porcentaje de oxígeno en las especies ciprés y quinal .....	- 54 -
<b>Figura 47:</b> Contenido de nitrógeno en las especies ciprés y quinal .....	- 55 -
<b>Figura 48:</b> Error estándar en el porcentaje de nitrógeno durante la experimentación .....	- 55 -
<b>Figura 49:</b> Porcentaje de azufre en las especies ciprés y quinal .....	- 56 -
<b>Figura 50:</b> Porcentaje de humedad en las especies ciprés (C) y quinal (Q) .....	- 58 -
<b>Figura 51:</b> Error estándar de la humedad en las especies ciprés y quinal .....	- 59 -
<b>Figura 52:</b> Contenido de materia volátil en las especies ciprés (C) y quinal (Q) ...	- 61 -
<b>Figura 53:</b> Error Estándar del contenido de materia volátil en los sustratos .....	- 62 -
<b>Figura 54:</b> Resultado del biochar obtenido a 200 °C, (A: ciprés; B: quinal) .....	- 64 -
<b>Figura 55:</b> Resultados de biochar a 250 °C de temperatura (A: ciprés; B: Quinal)-	- 65 -
<b>Figura 56:</b> Resultado de biochar a 300 °C (A: ciprés; B: quinal).....	- 66 -
<b>Figura 57:</b> Rendimiento másico de los seis tipos de biochar .....	- 67 -
<b>Figura 58:</b> Porcentaje de carbono en biochar de ciprés y quinal .....	- 69 -
<b>Figura 59:</b> Error Estándar del porcentaje de carbono en el biochar a 200 °C .....	- 70 -
<b>Figura 60:</b> Error Estándar del contenido de carbono en el biochar a 250 °C .....	- 71 -
<b>Figura 61:</b> Error Estándar del contenido de carbono en el biochar a 300 °C .....	- 72 -
<b>Figura 62:</b> Porcentaje de hidrogeno en biochar a partir de ciprés y quinal .....	- 73 -
<b>Figura 63:</b> Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 200 °C .....	- 74 -
<b>Figura 64:</b> Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 250 °C .....	- 75 -
<b>Figura 65:</b> Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 300 °C .....	- 76 -
<b>Figura 66:</b> Porcentaje de oxígeno en el biochar de ciprés y quinal.....	- 77 -
<b>Figura 67:</b> Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar a 200 °C.....	- 78 -

<b>Figura 68:</b> Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar de ciprés y quinal .....	- 78 -
<b>Figura 69:</b> Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar a 300 °C.....	- 79 -
<b>Figura 70:</b> Porcentaje de nitrógeno en el biochar de ciprés y quinal .....	- 80 -
<b>Figura 71:</b> Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a 200 °C .....	- 81 -
<b>Figura 72:</b> Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a la temperatura de 250 °C .....	- 82 -
<b>Figura 73:</b> Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a 300 °C .....	- 83 -
<b>Figura 74:</b> Porcentaje de azufre en biochar a partir de ciprés y quinal .....	- 84 -
<b>Figura 75:</b> Error estándar del porcentaje de azufre en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura .....	- 85 -
<b>Figura 76:</b> Error estándar del contenido de azufre en el biochar a 250 °C .....	- 86 -
<b>Figura 77:</b> Error estándar del contenido de azufre en el biochar a 300 °C .....	- 87 -
<b>Figura 78:</b> Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 200 °C de temperatura .....	- 89 -
<b>Figura 79:</b> Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 250 °C de temperatura .....	- 89 -
<b>Figura 80:</b> Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 250 °C de temperatura .....	- 90 -
<b>Figura 81:</b> Contenido de materia volátil en el biochar a partir de ciprés (C) y quinal (Q) .....	- 92 -
<b>Figura 82:</b> Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura .....	- 93 -
<b>Figura 83:</b> Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 250 °C de temperatura .....	- 94 -
<b>Figura 84:</b> Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 300 °C de temperatura .....	- 95 -
<b>Figura 85:</b> Poder calórico en el biochar obtenido a 3 temperaturas (ciprés (C); Quinal (Q)) .....	- 96 -
<b>Figura 86:</b> Error estándar del contenido de poder calórico en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura .....	- 97 -
<b>Figura 87:</b> Error estándar del poder calórico en el biochar obtenido a 250 °C de temperatura .....	- 98 -
<b>Figura 88:</b> Error estándar del contenido de poder calórico en el biochar obtenido a 300 °C de temperatura .....	- 99 -
<b>Figura 89:</b> Tasa de crecimiento semanal de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas de producción del biochar .....	- 101 -

<b>Figura 90:</b> Tasa de crecimiento semanal del tallo con respecto a los tratamientos y la temperatura de producción del biochar.....	- 102 -
<b>Figura 91:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento testigo (T) .....	- 103 -
<b>Figura 92:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 200 °C (T1) .....	- 103 -
<b>Figura 93:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 250 °C (T2) .....	- 104 -
<b>Figura 94:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 300 °C (T3) .....	- 104 -
<b>Figura 95:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinual a 200 °C (T4) .....	- 105 -
<b>Figura 96:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinual a 250 °C (T4) .....	- 105 -
<b>Figura 97:</b> Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinual a 300 °C (T4) .....	- 106 -
<b>Figura 98:</b> Tasa de crecimiento de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas .....	- 106 -
<b>Figura 99:</b> Tasa de crecimiento de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas .....	- 107 -
<b>Figura 100:</b> Gráfico del análisis estadístico ANOVA aplicado en la tasa de crecimiento de la raíz.....	- 108 -

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Clasificación taxonómica del quinal .....	- 9 -
<b>Tabla 2:</b> Clasificación taxonómica del ciprés .....	- 10 -
<b>Tabla 3:</b> Los Estados de crecimiento del trigo según las escalas de Zadoks.....	- 21 -
<b>Tabla 4:</b> Ubicación de coordenadas del parque lineal San Antonio .....	- 24 -
<b>Tabla 5:</b> Ubicación de coordenadas del parque Guantug .....	- 25 -
<b>Tabla 6:</b> Ubicación de coordenadas del parque central Simón Bolívar .....	- 26 -
<b>Tabla 7:</b> Biomasa residual para la producción y caracterización del biochar .....	- 26 -
<b>Tabla 8:</b> Materiales para recolección de la biomasa.....	- 27 -
<b>Tabla 9:</b> Materiales para el acondicionamiento de las muestras.....	- 27 -
<b>Tabla 10:</b> Materiales y equipos para el análisis CHN.....	- 27 -
<b>Tabla 11:</b> Materiales para análisis de oxígeno total.....	- 28 -
<b>Tabla 12:</b> Materiales para el análisis de azufre.....	- 28 -
<b>Tabla 13:</b> Materiales para el análisis de termogravimétrico .....	- 28 -
<b>Tabla 14:</b> Materiales para la germinación de semillas .....	- 29 -
<b>Tabla 15:</b> Peso de la biomasa residual de ciprés para la obtención de biochar expresado en g.....	- 39 -
<b>Tabla 16:</b> Peso inicial de la biomasa de quinal para la obtención de biochar expresado en g.....	- 39 -
<b>Tabla 17:</b> Peso de la biomasa residual de ciprés para obtener biochar expresado en g. .....	- 40 -
<b>Tabla 18:</b> Peso de la biomasa residual de quinal para obtener biochar expresado en g .....	- 40 -
<b>Tabla 19:</b> Peso de la biomasa de ciprés para obtener biochar expresado en g.....	- 40 -
<b>Tabla 20:</b> Peso de la biomasa de quinal para obtener biochar expresado en g....	- 41 -
<b>Tabla 21:</b> Tipos de análisis para la caracterización de biochar.....	- 42 -
<b>Tabla 22:</b> Dosis para las diluciones aplicadas en la germinación de trigo.....	- 43 -
<b>Tabla 23:</b> Codificación para los tratamientos del biochar.....	- 44 -
<b>Tabla 24:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz con todos los tratamientos en la primera semana de germinación expresado en cm.....	- 48 -
<b>Tabla 25:</b> Resultados del análisis elemental en los sustratos .....	- 50 -
<b>Tabla 26:</b> Resultados del análisis descriptivo de la caracterización química en los sustratos.....	- 50 -
<b>Tabla 27:</b> Contenido de Carbono/Nitrógeno en los dos tipos de biomasa residual .	- 57 -
<b>Tabla 28:</b> Porcentaje de humedad en la biomasa.....	- 58 -
<b>Tabla 29:</b> Porcentaje de humedad en los sustratos.....	- 58 -

<b>Tabla 30:</b> Corrección del porcentaje de humedad en la biomasa .....	- 59 -
<b>Tabla 31:</b> Contenido de materia volátil en la biomasa residual expresado en porcentaje .....	- 60 -
<b>Tabla 32:</b> Porcentaje de material volátil en la biomasa.....	- 61 -
<b>Tabla 33:</b> Peso de la biomasa para la producción del biochar expresado en g.....	- 63 -
<b>Tabla 34:</b> Rendimiento del biochar producido a 3 temperaturas expresado en porcentaje.....	- 63 -
<b>Tabla 35:</b> Resultado de la caracterización química del biochar expresado en porcentaje.....	- 67 -
<b>Tabla 36:</b> Contenido de carbono del biochar expresado en porcentaje .....	- 68 -
<b>Tabla 37:</b> Contenido de hidrógeno total en el biochar expresado en porcentajes ....	- 72 -
<b>Tabla 38:</b> Porcentaje de oxígeno en el biochar de ciprés y quinal .....	- 76 -
<b>Tabla 39:</b> Contenido de nitrógeno en el biochar expresado en porcentaje .....	- 79 -
<b>Tabla 40:</b> Contenido de azufre en biochar expresado en porcentaje .....	- 83 -
<b>Tabla 41:</b> Contenido de humedad en la biomasa para la producción de biochar expresado en porcentaje .....	- 88 -
<b>Tabla 42:</b> Contenido de materia volátil en el biochar a 3 temperaturas de torrefacción expresado en porcentaje .....	- 91 -
<b>Tabla 43:</b> Contenido de material volátil del biochar expresado en porcentaje .....	- 92 -
<b>Tabla 44:</b> Contenido de poder calórico en los 6 tipos de biochar expresado en cal/g .....	- 95 -
<b>Tabla 45:</b> Contenido de poder calórico superior del biochar expresado en cal/g .....	- 97 -
<b>Tabla 46:</b> Promedio de la tasa de crecimiento semanal de la raíz expresado en cm .....	- 100 -
<b>Tabla 47:</b> Resultado del promedio de la tasa de crecimiento del tallo expresado en cm.. .....	- 101 -
<b>Tabla 48:</b> Análisis de varianza con los datos del crecimiento semanal de la raíz .-	- 108 -
<b>Tabla 49:</b> Análisis de varianza con los datos del crecimiento semanal de la raíz con respecto a la temperatura y los tratamientos .....	- 109 -

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar de quinual obtenido a 200 °C de temperatura expresado en cm .....	- 118 -
<b>Anexo 2:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar a partir de ciprés obtenido a 250 °C de temperatura expresado en cm.....	- 119 -
<b>Anexo 3:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz en cm con el tratamiento: biochar de quinual obtenido a 250 °C de temperatura.....	- 120 -
<b>Anexo 4:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz en cm con el tratamiento de biochar a partir de ciprés obtenido a 300 °C de temperatura.....	- 121 -
<b>Anexo 5:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar de quinual obtenido a 300 °C de temperatura expresado en cm .....	- 122 -
<b>Anexo 6:</b> Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento de testigo expresado en cm .....	- 123 -
<b>Anexo 7:</b> Promedio del crecimiento semanal del tallo con los respectivos tratamientos: biochar de ciprés (CP), quinual (QN) y testigo (T) y las 3 temperaturas de producción: 200 °C (I), 250 °C (II) y 300 °C (III) .....	- 124 -

## RESUMEN

En la actualidad el uso del biochar ha despertado gran interés por sus supuestos aportes en la mejora de la calidad del suelo y el aumento en la productividad de cultivos, esta investigación se ha centrado en utilizar las podas de 2 tipos de biomasa: quinual y ciprés, por ser abundantes y presentan un mayor crecimiento a corto plazo. Se elaboró biochar por el método de torrefacción a 3 temperaturas, el biocarbón resultante fue caracterizado para conocer sus propiedades químicas mediante los análisis: elemental CHONS (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), termogravimétrico (TGA) y poder calórico. Posteriormente los 6 tipos de biochar fueron sometidos a un experimento para evaluar su influencia en la tasa de crecimiento de la raíz y tallo del trigo en 30 días. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las propiedades químicas evaluadas según la materia prima empleada. Otro aspecto concluyente, el biochar de quinual producido a la temperatura de 300 °C, resultó tener mejor efectividad durante la germinación de las plántulas de trigo, por lo que se recomienda evaluar el efecto del biochar en otras semillas de interés comercial y alimenticio.

**PALABRAS CLAVE: BIOMASA, BIOCHAR, TEMPERATURA, TORREFACCIÓN, CARACTERIZACIÓN, GERMINACIÓN.**

## **ABSTRACT**

Nowadays, the use of biochar has developed great interest because of its supposed contributions in improving soil quality and increasing crop productivity. This research has focused on using pruning of 2 types of biomass: quinal and cypress, as they are abundant and show better growth in a short term. Biochar was made by the roasting method at three temperatures, the resulting biochar was characterized to know its chemical properties through the analyzes: elemental CHONS (carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen and sulfur), thermogravimetric (TGA) and caloric power. Subsequently, the 6 types of biochar were taken under an experiment to evaluate their influence on the growth rate of the root and stem of the wheat in 30 days. It was found statistically significant differences in the chemical properties evaluated according to the raw material used. Another conclusive aspect was that the quinal biochar produced at the temperature of 300 ° C, turned out to have better effectiveness during the germination of wheat seedlings, so it is recommended to evaluate the effect of the biochar on other seeds of commercial and nutritional interest.

**KEYWORDS: BIOMASS, BIOCHAR, TEMPERATURE, ROASTING, CHARACTERIZATION, GERMINATION.**

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos del futuro energético podría ser la apuesta por las tecnologías de emisiones carbono-negativas, entre las que figura la pirólisis de la biomasa, con la finalidad de obtener biocombustible y el aprovechamiento del carbono residual como enmienda de suelos y facilitar el secuestro de carbono (Urien, 2013). La problemática de los residuos forestales comienza con el desarrollo de la sociedad moderna en la que vivimos, no sólo en el aspecto referido a la cantidad de residuos que ésta genera (difícilmente asimilable por la naturaleza), sino y de manera importantísima a la calidad de los mismos, ya que estos residuos han ido incrementando de manera alertante debido a que no presentan un adecuado tratamiento, estos residuos se caracterizan por encontrarse de forma dispersa en el territorio donde se producen a diferencia de los combustibles fósiles, que se encuentran concentrados espacialmente y requieren de una serie de pretratamientos o transformaciones para ser objeto de un aprovechamiento eficiente, la biomasa forestal actualmente está siendo estimada como fuente renovable importante que puede aportar a la economía, sostenibilidad y seguridad energética de todo un país (Edenhofer et al., 2016).

Para los países en vías de desarrollo, el aprovechamiento de residuos de cosechas y podas resultan muy beneficiosos, aunque no se precisan términos exactos es innegable que puedan presentarse como un gran fuente de aprovechamiento, ya que podría dar diversas aplicaciones contribuyendo con la mejora de la calidad del medio ambiente, es por ello que mediante esta investigación propone transformar toda la biomasa residual para minimizar impactos que generan los mismos, en donde se trata de implementar alternativas limpias como la fabricación de biochar (Parra, 2016).

Eliminar la biomasa forestal requiere de grandes esfuerzos, sin embargo el desarrollo de nuevas tecnologías permite aprovechar estos residuos y convertirlos en energía limpia y renovable, siempre garantizando a la sociedad un ambiente saludable como lo expresa la constitución del Ecuador, en donde se “reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay* y el estado promoverá en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes de bajo impacto” (Asamblea Nacional 2008).

Hoy en día el uso de biochar ha despertado un gran interés en la sociedad, la palabra inglesa biochar es un término de reciente aparición y se refiere al producto de grano fino, estable y rico en carbón poroso, se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante la técnica denominada pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado, que genera diversos aportes: en la lucha contra el calentamiento global, la mejora de la calidad del agua, el aumento en la producción de cultivos y su capacidad para remediar suelos contaminados (Abenza, 2012). El biochar es una de las prácticas innovadoras y actualmente recomendadas por la FAO (Food and Agriculture Organization) la misma, que viene realizando diversas gestiones y propuestas ante organismos de protección ambiental, con el objeto de aplicar buenas prácticas ambientales y conservacionistas.

The International Biochar Initiative (IBI), menciona que el biochar (biocarbón), es un carbón de grano fino y altamente poroso, está siendo considerado en diferentes regímenes de operación y materias primas. Adicionalmente, en conjunto con algunas entidades ecuatorianas, se están llevando a cabo ensayos de invernadero que buscan evaluar la capacidad que tendría el biochar producido para prevenir la adsorción de metales en suelos contaminados actualmente albergan una gran parte de cultivos y reduce la necesidad de fertilizantes alrededor de un 10 %, además de su aplicación para remediación de aguas, absorción de carbono entre otras aplicaciones (Escalante et al., 2016).

La motivación principal de este tema de investigación es utilizar los residuos forestales de quinal (*Polylepis incana*) y ciprés (*Cupressus macrocarpa*) que se generan en gran cantidad en el cantón Cañar, estos residuos de biomasa se deben gestionar de manera rápida, por ser un problema ambiental debido a que se acumulan y son quemados directamente, este problema ha generado un alto índice de contaminación por CO<sub>2</sub> liberado al medio ambiente contribuyendo al calentamiento global y al efecto invernadero.

Ante dicha problemática, este trabajo se concentra en el estudio experimental que propone la producción de biochar mediante el método de torrefacción a tres temperaturas (200 °C, 250 °C y 300 °C) a partir de los residuos forestales de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y quinal (*Polylepis racemosa*) con el propósito de evaluar la calidad en base a su composición química para su posterior aplicación en la germinación de semillas.

Para cumplir con la caracterización del biochar se realizó mediante el análisis elemental CHONS (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), termogravimétrico (TGA), humedad, material volátil y poder calórico. Una vez que se analizó la composición química del biochar, se evaluó su efectividad en la germinación de plántulas de trigo, debido a que es una de las técnicas de tecnología limpia que ha surgido con procesos de bajo costo, el uso de este material, incrementa la cantidad de materia orgánica del suelo, a la vez modifica las condiciones de acidez (pH), altera los coeficientes de intercambio catiónico, permitiendo mejorar el rendimiento en diferentes tipos de cultivos. Su estructura porosa, es también utilizado como un aditivo en zonas de baja pluviosidad, en las que se ha demostrado que es capaz de estabilizar el nivel de humedad en el suelo (Herdia Salgado & Tarelho, 2018).

Adicionalmente la incorporación de biochar como estructurador y material de base para nutrientes durante el proceso de compostaje, ha optimizando la degradación de la materia orgánica a la vez que reduce las emisiones de amonio y gases de efecto invernadero, vale la pena recalcar que el uso del biocarbón es considerado como una estrategia de mitigación al cambio climático, dada la capacidad de secuestrar carbono sólido en los campos agrícolas por cientos e inclusive, miles de años (Martínez & Bohórquez, 2017).

### **Objetivo General**

Evaluar el biochar producido a tres temperaturas, mediante la caracterización química para estimar sus posibles efectos potenciales

### **Objetivos Específicos**

- Producir biochar a partir de los residuos forestales de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y quinal (*Polylepis racemosa*) mediante el método de torrefacción.
- Determinar en laboratorio las características químicas del biochar obtenido a partir de los residuos de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y quinal (*Polylepis racemosa*) mediante el análisis elemental CHONS (carbono total, hidrógeno, oxígeno total, nitrógeno y azufre)
- Determinar la humedad y material volátil del biochar producido a partir de los residuos forestales de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y quinal (*Polylepis racemosa*).

- Determinar el poder calórico del biochar producido a tres temperaturas de las especies forestales de ciprés (*Cupressus macrocarpa*) y quinal (*Polylepis racemosa*).
- Evaluar los tipos de biochar obtenidos a 3 temperaturas en la germinación de semillas.

### **Hipótesis**

El biochar obtenido a tres temperaturas, difiere en las características químicas de acuerdo al tipo de madera

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Biomasa

##### 2.1.1 Definición.

Biomasa es toda materia orgánica originada en un proceso biológico, utilizado como fuente de energía o como productos de transformación para diferentes fines, es susceptible a ser aprovechada de forma industrial, es generada por residuos de claras y clareos, residuos de poda, residuos de cortes finales que agrupan ramas, rabeones y tocones, esta materia prima es utilizada para la transformación de madera o para la generación de combustible (Ludeña & Vázquez, 2017).

Iglesias (2018) manifiesta que la biomasa es una forma de energía renovable que puede ser importante desde el punto de vista energético y ambiental, ya que se considera como un gran aporte para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales; mientras que Toscano (2009) define a la biomasa como el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, estos residuos provienen de cualquier actividad. Por otro lado Velázquez (2018), conceptualiza a la biomasa como cualquier materia de origen orgánico no fosilizada, que presenta múltiples usos y utilidades para los seres humanos pues contribuye en la alimentación y es materia prima para gran número de industrias además se considera como fuente de energía, ya que se puede transformar en combustibles.

##### 2.1.2 Necromasa.

Hace referencia a toda biomasa muerta que incluye árboles caídos y tocones, otros desechos leñosos gruesos, la capa de hojarasca y el carbón vegetal o materia orgánica parcialmente carbonizada sobre la superficie del suelo (López Merchán, 2017). Así mismo Araujo et al (2011) manifiestan que la necromasa es parte de la biomasa de un ecosistema, formada por cadáveres y órganos muertos, en algunos casos adheridos a los seres vivos, como el caso de las ramas, hojas muertas, además de esta necromasa, en el suelo forma gran cantidad de materia orgánica con diverso grado de descomposición, ya que llega a formar humus.

Alarcón (2009) argumenta que la necromasa es parte de la biomasa de un ecosistema, compuesto por madera y órganos muertos, en algunos casos se encuentran

unidos a los árboles vivos, ecológicamente la madera muerta juega un papel importante como estructura de la biodiversidad y fuente de alimento para muchos organismos, además es importante porque alberga gran cantidad de carbono, es parte de la cadena trófica y de gran interés en la productividad de los bosques, otro de los roles importantes es que la necromasa sirve de nutrientes para el suelo, almacena sedimentos y es de protección física estableciendo semillas.

### **2.1.3 Tipos.**

#### *a. Biomasa Natural.*

Se produce en la naturaleza sin la intervención humana para potenciarla o para modificarla, la explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del medio ambiente aun que se considera que es la principal fuente energética en los países subdesarrollados, se trata de residuos forestales como: derivados de limpieza de bosques, restos de plantaciones, leñas y ramas (Patiño Martínez, 2014).

#### *b. Biomasa Residual.*

Es la generada en las actividades humanas que utilizan materia orgánica, en los procesos productivos agrícolas, forestales o ganaderos, así como la que se producido en los centros urbanos de las ciudades, su eliminación en muchos casos representan un grave problema, es por ello que se buscan alternativas para utilizar estos residuos para mejorar la calidad de vida de la población (Herguedas et al., 2012).

### **2.1.4 Importancia.**

La biomasa es importante tema de estudio debido a que existen intereses industriales, energéticos y ambientales. La búsqueda de modelos ambientales alternativos, han llevado a que en la actualidad se mire a la biomasa buscando soluciones energéticas y ambientales eficientes que permitan nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios como la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera CO<sub>2</sub>, principal causante del efecto invernadero y SO<sub>2</sub> que ocasiona la lluvia ácida (Iglesias, 2018).

En un estudio realizado por Herguedas et al., (2012), consideran que la biomasa con fines energéticos posee numerosas ventajas en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a otros combustibles fósiles, al momento de combustionar para la obtención de biocarbón, la cantidad de dióxido de carbono emitida causante del efecto

invernadero, se considera que es la misma captada por plantas durante su crecimiento, por lo tanto combustionar biomasa no supone incremento de gases a la atmósfera.

## **2.2 Aprovechamiento de la biomasa**

Ludeña & Vázquez (2017) mencionan que los residuos vegetales al ser un producto de segundo orden básicamente constituido por partes pequeñas, ramas, hojas, cáscaras, el aprovechamiento se lo puede realizar mediante el uso de los mismos para generar compost y energético, disminuyendo su tamaño para repartirlo sobre el suelo que sirva como enmienda de abono en el desarrollo de plantaciones.

### **2.2.1 Podas forestales del cantón Cañar.**

Cañar está situado al noreste de la provincia del mismo nombre, limita por el norte con la provincia de Chimborazo, al sur con la provincia del Azuay al este por el cantón Azogues y al oeste por la provincia del Guayas, con una altitud de 3 160 ms.n.m. La temperatura media anual es de 12 °C, tiene una extensión de 1 751.20 km<sup>2</sup>, siendo este cantón con mayor extensión en la provincia ya que ocupa el 56.07 % del territorio (INEN, 2010).

En el cantón Cañar el 80 % de la superficie de árboles plantados corresponden a cuatro especies representativas entre ellas tenemos, pino, eucalipto y ciprés, el 20 % restante a especies nativas como arrayán, bromelias, galuay, porotillo, sigse, puma maqui y chilcas, la mayoría de estos árboles son plantados en sistemas agroforestales y sirven de ornamento para los parques de la ciudad (Galarza, 2018).

La empresa municipal mancomunada de aseo integral del pueblo cañari EMAIPC-EP, realiza las gestiones de limpieza y retiro de las podas de los árboles que se genera promoviendo la gestión integral sostenible de los residuos sólidos en el territorio mancomunado del pueblo cañari, en la actualidad no existen datos sobre generación de biomasa vegetal ya que esta empresa es pionera en este cantón.

### **2.2.2 Biomasa residual para el estudio**

#### **a. *Quinual (Polylepis racemosa)***

El género *Polylepis* consta de 16 especies distribuidas en los Andes desde Venezuela hasta Chile y Argentina. En el Ecuador están representadas 7 especies en los bosques alto andinos y páramos: *Polylepis incana*, *P. lanuginosa*, *P. microphylla*, *P. reticulata*, *P.*

sericia, *P. weberbaueri* y una especie introducida *P. racemosa* (Gualavisí Quimbiamba, 2008).

El nombre *Polylepis* se deriva de las palabras griegas, poly (muchas) y lepis (láminas), refiriéndose a la corteza compuesta por múltiples láminas que se desprenden en delgadas capas (Figura 1). Este tipo de corteza cubre densamente el tronco, que lo protege contra bajas temperaturas (Rosero, 2014).



**Figura 1:** Especie quinal (*Polylepis racemosa*)

La especie *Polylepis racemosa*, se desarrolla en zonas altas y frías a lo largo de la vertiente andina oriental y en la vertiente occidental del Ecuador, en diferentes pisos altitudinales desde los 3 000 ms.n.m. a 4 500 ms.n.m. (García & Moreta, 2019).

Las características de (*Polylepis racemosa*) descritas Rosero (2014) son:

- **Raíz:** son adventicias que surgen de un nudo del tallo cuando se multiplica en otra planta y crecen hacia el centro de la tierra.
- **Tallo:** árbol mediano, su tronco es irregular y nudoso, con ramas gruesas y es de crecimiento rápido.
- **Medición:** varía entre 8 m a 12 m de altura y 20 cm de diámetro
- **Corteza:** la externa es lisa, de color marrón rojizo y con pequeñas láminas como la consistencia de trozos de papel, de color rojizo, la corteza interna es muy delgada.
- **Hojas:** está compuestas de tres a cinco láminas, alternas en espiral, estas láminas son elípticas a oblongas de 2.5 cm a 3.5 cm de longitud por 1 cm de ancho, con el ápice redondo y agudo. Los peciolo miden de 2 cm a 3 cm de longitud.

**Tabla 1:** Clasificación taxonómica del quinal

<b>Clasificación Taxonómica</b>	
<b>Reino</b>	<i>Plantae</i>
<b>División</b>	<i>Spermatophytae</i>
<b>Subdivisión</b>	<i>Angiospermae</i>
<b>Clase</b>	<i>Dicotyledonae</i>
<b>Subclase</b>	<i>Archyclamidaeae</i>
<b>Orden</b>	<i>Rosales</i>
<b>Familia</b>	<i>Rosaceae</i>
<b>Género</b>	<i>Polylepis</i>
<b>Especie</b>	<i>racemosa</i>
<b>Nombre científico</b>	<i>Polylepis racemosa</i>
<b>Nombres comunes</b>	<i>Coloradito</i> <i>(Venezuela); queñual</i> <i>(Perú); Palo colorado,</i> <i>quinual, siete cortezas</i> <i>(Ecuador)</i>

**Fuente:** García & Moreta (2019)

- **Usos:** Se utiliza para leña y carbón, así como las hojas sirven de alimento para los animales, también se usa como materia prima para elaborar materiales para arado, cabos de herramientas, muebles, cucharas, además sirve también como barrera contra vientos y sombra para animales (Minga & Verdugo, 2016).
- **Reproducción:** Para este género se practican tres métodos por esquejes o ramillas, por estacas y por acodos, además la reproducción puede ser sexual como asexual.
- **Reproducción por esqueje:** Es la multiplicación vegetativa, que consiste en tomar un fragmento de una planta sana para obtener otra planta idéntica genéticamente.
- **Reproducción por estacas:** Hace referencia a tallos lignificados de 20 cm a 35 cm de longitud, en donde se entierran hasta un tercio de su longitud mantenido bajo semisombra hasta que broten las raíces.
- **Acodos:** es una técnica de propagación que consiste en la formación de raíces del tallo que está adherido a la planta madre, es decir que del tallo brotan raíces el cual se separa para convertirse en una nueva planta (García & Moreta, 2019).

#### **b. Ciprés (*Cupressus macrocarpa*)**

Es un árbol originario de la Bahía de Monterrey en California, Estados Unidos. En el Ecuador se distribuye en las provincias de Pichincha, Cañar, Azuay, Carchi y Chimborazo a 3 200 m de altitud, su tronco es maderable y por su follaje denso, se utiliza

en cortinas rompe vientos (Minga & Verdugo, 2016). El género *Cupressus* tiene 20 especies, entre ellas tenemos: *sempervirens* (ciprés común), *Cupressus arizónica* (ciprés de Arizona), *Cupressus macrocarpa* (ciprés de Monterrey), *Cupressus funebris* (ciprés llorón) y *Cupressus lusitánica* (ciprés de Portugal) (Merino, 2015). El ciprés es un árbol de follaje perenne, llegando a vivir 300 años, alcanzando alturas 25 m con una copa amplia, la corteza es de color grisáceo y forma numerosas ramas con madera de baja humedad y densidad (Figura 2), por lo cual fácilmente agrietable y quemable, sus hojas escamiformes, ápice de color verde oscuro con semillas de 5 mm a 6 mm de largo (Minga & Verdugo, 2016).



**Figura 2:** Especie ciprés (*Cupressus macrocarpa*)

La Clasificación taxonómica del ciprés se describe en la (Tabla 2):

**Tabla 2:** Clasificación taxonómica del ciprés

<b>Clasificación Taxonómica</b>	
<b>Reino</b>	<i>Plantae</i>
<b>División</b>	<i>Pinophyta</i>
<b>Clase</b>	<i>Pinopsida</i>
<b>Sub clase</b>	<i>Pinidae</i>
<b>Orden</b>	<i>Pinales</i>
<b>Familia</b>	<i>Cupressaceae</i>
<b>Género</b>	<i>Cupressus</i>
<b>Especie</b>	<i>Cupressus macrocarpa</i>
<b>Nombre Común</b>	<i>Ciprés, ciprés de california</i>

**Fuente:** (Minga & Verdugo, 2016)

- **Usos:** Es cultivado como planta de sombra y ornato por la belleza y aroma de su follaje, se utiliza para la formación de setos y como barrera contra viento, la mayoría de sus variedades con interés ornamental se producen en viveros comerciales y también pueden ser cultivados como bonsái (Merino, 2015).

## **2.3 Biochar**

### **2.3.1 Definición.**

También conocido como biocarbón, es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno (pirólisis), a temperaturas relativamente bajas inferiores a los 700 °C (Escalante et al., 2016). El biochar es un carbón cuidadosamente seleccionado para ser empleado como mejorador de suelos, funciona en toda clase de cultivos: hortalizas, granos y césped; no presenta sales que causen daño a la raíz de las plantas ni metales pesados que provoquen fitotoxicidad (Olmo, 2016).

Iglesias (2018) señala que el biochar se produce por la transformación mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica de la biomasa con rangos de temperatura entre los 300 °C a 500 °C, por lo que se convierte en un material rico en contenido de carbono y cenizas que se devuelven al suelo incorporando propiedades nutritivas, mejorando su fertilidad.

Biochar o carbono pirogénico, es el producto rico en carbono, resultado de la carbonización de materias primas como: residuos de cosecha, plantas secas, desperdicios orgánicos, estiércol, madera, lodos residuales y residuos forestales a temperaturas de 500 °C a 1 000 °C, sin oxígeno (Diaz, 2017).

The International Biochar Initiative (2012) hace referencia al biochar como un material sólido, obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno, creado a través del calentamiento de biomasa mediante pirólisis con temperaturas de 350 °C hasta 900 °C con aplicación para mejorar los suelos, otros procesos más que son factibles para la carbonización son la torrefacción y la carbonización hidrotérmica.

Estudios recientes proponen intensificar el uso del biochar como una estrategia viable de tratamiento de biomasa residual de los sistemas agroforestales, ya que presentan grandes ventajas en la adición de nutrientes y mejorar condiciones físico químicas de suelo (Castro, 2018).

### **2.3.2 Composición Química.**

La composición química de los biocarbones es muy similar al carbón para combustible, sin embargo, el biochar presenta relaciones O/C más altas que el carbón mineral, otros estudios sugieren que los componentes del biocarbón son altamente recalcitrantes en los suelos, es decir resisten a la oxidación química y biológica (Iglesias, 2018). La composición del biochar varía de acuerdo al tipo de materia prima empleada, sin embargo se encuentra compuesto principalmente de carbono orgánico recalcitrante y de contenidos macro y micronutrientes retenidos de su materia prima original además de otros elementos como carbono total (C), oxígeno total (O), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S), contenido de carbono fijo y cenizas (Escalante et al., 2016).

Otros autores consideran que la composición del biocarbón dependerá de las condiciones de pirólisis puesto a que algunos contaminantes pueden formarse durante el proceso de producción como los hidrocarburos aromáticos policíclicos formados a partir de cualquier materia carbonácea (Guerra, 2015).

### **2.3.3 Beneficios ambientales del biochar.**

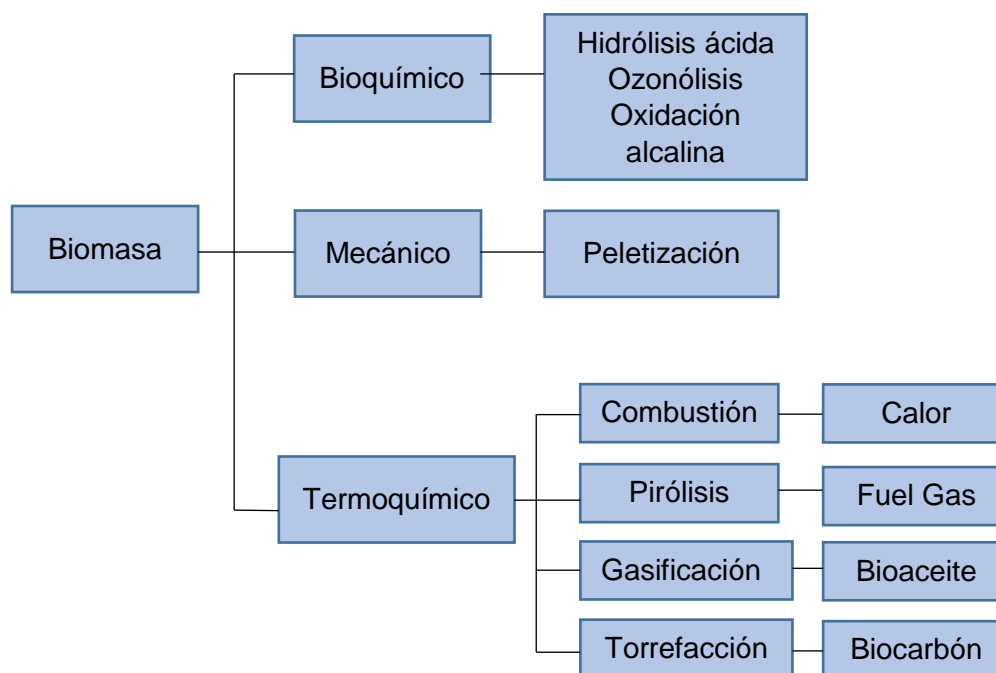
El biochar tiene diferentes utilidades, ya que se ha utilizado en la agricultura para mejorar condiciones de suelo y ayudar con el desarrollo de los cultivos favoreciendo en la calidad de las cosechas (Iglesias, 2018). Al mismo tiempo (Aranda Trujillo, 2017) expresa que la aplicación del biochar como una enmienda en los suelos, podrían beneficiar a los agricultores a promover un tipo de agricultura sostenible a partir del aprovechamiento de toda la biomasa, reduciendo costos de insumos y reduciendo la huella de carbono.

El biocarbón presenta propiedades que favorecen el crecimiento vegetal, tales como el incremento de retención de agua y gran capacidad de intercambio catiónico del suelo, además al aplicar al suelo se puede aumentar su permeabilidad al agua y se reduce la escorrentía y los costos de riego (Escalante et al., 2016). Otro de los beneficios del biochar según (Cueto, 2016) plantea que al incorporar al suelo podría reducir significativamente las emisiones netas de gases de efecto invernadero.

Oses Orbegozo (2013) expone que el biocarbón combinado con la inoculación de *Bacillus subtilis*, mejora el crecimiento de las plantas de tomate, el mismo que fue utilizado como fertilizante junto con compost orgánico con un promedio de 13 por ciento, aumentando el peso seco aéreo de las plantas.

## 2.4 Métodos de transformación de la biomasa

En general, la biomasa puede ser sometida a diferentes procesos para ser utilizada como fuente de energía, estos procesos transforman la energía acumulada en forma de carbono e hidrógeno, combustibles sólidos líquidos y gaseoso; la biomasa puede transformarse en productos de mayor valor agregado, al tratarse con diferentes métodos como se aprecia en la figura 3 (Guerra, 2015).



**Figura 3:** Métodos de transformación de la biomasa

La tecnología adecuada para dicha transformación depende de la composición, grado de humedad y producto final deseado, ya que para biomásas con un bajo contenido de humedad es recomendable utilizar una conversión térmica, y para biomásas con alto contenido de humedad es mejor realizar una conversión (Arauzo & Gonzalo, 2014).

### 2.4.1 Torrefacción.

Es un pretratamiento termoquímico realizado a temperaturas entre 200 a 350 °C en ausencia de oxígeno, y puede emplearse a diferentes materiales orgánicos, este método experimenta diferentes procesos como la desvolatilización, deshidratación, despolimerización y carbonización, es decir la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente mientras se calienta, degrada la hemicelulosa a bajas temperaturas, luego la celulosa a temperaturas altas y finalmente cambia las

propiedades de la lignina ya que se reduce el contenido de fibra (Patiño Martínez, 2014). Como subproducto de esas reacciones se genera agua, compuestos orgánicos volátiles como el metanol, ácido fórmico y acético e incondensables como el CO, CO<sub>2</sub>, y traza de hidrocarburos, disminuye la relación de O/C y H/C, y aumenta el poder calórico (Alba Reyes et al., 2018).

A medida que transcurre el proceso de torrefacción, la biomasa va cambiando su color y sus propiedades, en las primeras etapas del proceso se consume calor y existe pérdida de masa, al llegar a una temperatura de 100 °C la biomasa pierde humedad; la siguiente etapa es el secado, en donde se elimina completamente la humedad y se da a temperatura constante; el proceso de postsecado se da a temperaturas entre 150 °C y 200 °C, en él se rompen los enlaces de hidrógeno y carbono dando como resultado la emisión de extractos lipofílicos y se da la deformidad, la biomasa no puede recuperar su estructura original y no se humedece, alcanzando al proceso de torrefacción donde se produce biocarbón como se detalla en la (Figura 4) (Armendáriz, 2014).

En la torrefacción de 200 °C la reacción es totalmente exotérmica y la producción del gas aumenta debido a la carbonización y desvolatilización, esta etapa presenta interacciones intramoleculares de los enlaces de hidrógeno C-C y C-O, se forman extractos como hidrófilos, ácidos carboxílicos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) por lo que la estructura celular se destruye haciéndose mucho más frágil; a una temperatura mayor a 300 °C se da la desvolatilización y carbonización, cambia totalmente su color y al enfriarse no existen cambios en su estructura o composición (Tumuluru et al., 2011).

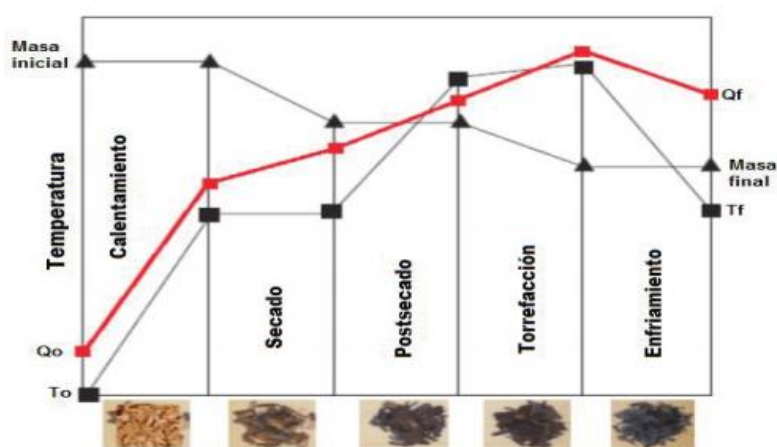


Figura 4: Método de Torrefacción

Fuente: (Bermeo, 2018)

La temperatura es un parámetro importante en la torrefacción ya que define la degradación térmica alcanzada, misma que puede explicarse a través de la descomposición de cada uno de los polímeros que conforman la estructura celular, influye directamente sobre el aumento o disminución de la composición de la biomasa ya que hay pérdidas de hidrógeno y oxígeno por la formación de agua, monóxido y dióxido de carbono, aumenta el contenido de carbono y disminuye el contenido de hidrógeno y oxígeno (Bermeo, 2018).

El proceso de torrefacción influye significativamente en la composición proximal y elemental de la biomasa, las temperaturas de torrefacción mayores permiten el aumento en el contenido de carbono, pero provocan la disminución del contenido de hidrógeno y oxígeno, debido a la formación de agua, CO y CO<sub>2</sub> (Tauro, 2013).

#### **2.4.2 Pirólisis lenta.**

Este tipo de pirólisis es comúnmente utilizada para producir biochar, la materia prima se descompone a temperaturas de 200 °C y 500 °C, los grupos presentes en la superficie se reducen durante el proceso de pirólisis, el incremento de la temperatura produce biochar con disminución de acidez, el biochar obtenido mediante este proceso es utilizado para el uso en aguas residuales (Martínez & Bohórquez, 2017).

#### **2.4.3 Pirólisis rápida.**

Es un proceso de calentamiento mayor a 200 °C de temperatura, donde la biomasa se calienta rápidamente, sin presencia de oxígeno, el cual se descompone generando vapores, aerosoles y carbonizado, se destaca por realizarse en condiciones que favorecen altos coeficientes de transferencia de calor y tasas de calentamiento (Müller et al., 2013), el tiempo de residencia es corto por lo que permite maximizar el rendimiento y evitar la fragmentación térmica e impedir la recombinación de productos primarios de pirólisis a precursores del carbón (Escalante et al., 2016).

### **2.5 Caracterización química del biochar**

#### **2.5.1 Análisis Elemental CHONS.**

Es una técnica que permite determinar el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre presentes en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas, se basa en la completa e instantánea oxidación mediante una combustión con oxígeno puro, en el cual el carbono e hidrógeno

se oxidan exotérmicamente formando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Bermeo, 2018). Las principales áreas de aplicación son: Análisis de fármacos, suelos y sedimentos, polímeros, industria alimenticia, control ambiental, materiales agrícolas, productos naturales, aceites, biomasa forestal, carbón, entre otras (Castro, 2018). El equipo que se usa para éste análisis se visualiza en la (Figura 5).



**Figura 5:** Equipo para el análisis elemental

#### **a. Carbono Total**

Los átomos se relacionan con el estado de oxidación del combustible para la generación de calor. El porcentaje de carbono permite estimar el  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  que se produce en la combustión de la biomasa (Márquez, 2009).

El Carbono (C) es el componente principal de la biomasa leñosa, el que mediante su oxidación libera energía, al igual que el H. En cambio, el O se encuentra oxidando de forma parcial a los otros dos elementos, contribuyendo a este proceso durante la transformación termoquímica, a diferencia del carbón mineral. Esto aclara el valor comparativo bajo del poder calorífico de la madera respecto del carbón mineral. El contenido de C e H contribuyen positivamente en el poder calorífico, mientras que el contenido de O lo hace de modo negativo (Carmona, 2015).

#### **b. Hidrógeno**

En la madera torrefactada se encuentra en forma de humedad, agua de hidratación o como constituyente de los silicatos de la materia mineral, permite determinar la cantidad de agua que se produce durante la combustión (Lara et al., 2013). Las moléculas de hidrógeno y oxígeno se liberan en forma de vapor que propician una serie de reacciones para formar gases como  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  (Herguedas et al., 2012).

### **c. Oxígeno Total**

Se considera un indicador del rango de oxidación, la cantidad de oxígeno está relacionada con la formación de óxidos de nitrógeno emitidos en los gases de combustión; la madera torrefactada supera la calidad de la biomasa sin tratar, contiene menos carbono y más oxígeno (Demirbas, 2019).

### **d. Nitrógeno**

Se relaciona con la formación de óxidos de nitrógeno, la cantidad de nitrógeno en la biomasa no produce efectos negativos al medio ambiente si se compara con los combustibles fósiles. La madera torrefactada producida a bajas temperaturas retiene mayor porcentaje de nitrógeno, mientras que, a temperaturas altas es liberado en forma de gas (Goche et al., 2015).

### **e. Azufre**

El contenido de azufre tiene efectos negativos al relacionarse con varios problemas medioambientales, reduce la temperatura, limita la expulsión de gases y al oxidarse permite la formación de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) lo que causa problemas en calderas y finalmente se transforma en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que es liberado a la atmósfera. Los valores de una madera torrefactada son menores al comparar con los combustibles fósiles (Goche et al., 2015).

## **2.5.2 Análisis termogravimétrico TGA.**

El análisis próximo proporciona información sobre la caracterización de la muestra un proceso previo de pirólisis, incluyendo el porcentaje de humedad, materia volátil, carbono fijo y contenido de cenizas, el contenido de cenizas se relaciona con el valor de cal (óxido de calcio) y el contenido de elementos inorgánicos del biochar, mientras que la materia volátil y el carbono fijo se utilizan con el fin de determinar las fracciones de biochar frágiles y recalcitrantes (Castro, 2018).

### **a. Humedad.**

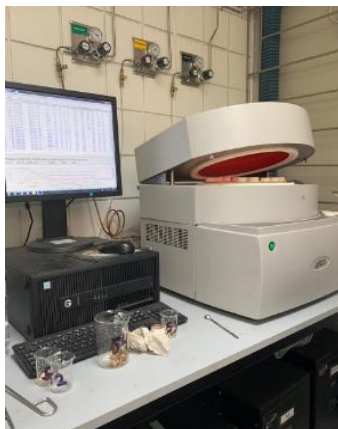
Es la cantidad de agua presente en los poros de la biomasa, que tiene la capacidad de absorber, su presencia incrementa el peso del producto, dificulta y genera humos durante la transformación de la materia prima (Goche et al., 2015).

### **b. Volátiles.**

Son los gases que posteriormente se pueden condensar formando residuos líquidos, alquitranes y ácidos piroleñosos que permanecen después del proceso de la torrefacción (Castro, 2018).

### **c. Cenizas.**

Hace referencia a los residuos sólidos de la combustión producidos en altas temperaturas de los silicatos, carbonatos, sulfatos y otros minerales; afecta la manipulación y los costos globales del proceso, en gran cantidad se consideran un contaminante ambiental (Demirbas, 2019). Para este análisis se usa el equipo analizador termogravimétrico, modelo TGA 701 de marca LECO (Figura 6), presenta resultados automáticamente por gravimetría registrada, la pérdida de peso en función de la temperatura en una atmósfera de gases (Mistretta et al., 2011).



**Figura 6:** Analizador termogravimétrico

El equipo analizador posee controles operacionales que mejoran la exactitud de la temperatura de trabajo hasta 1 000 °C y dispone de un montaje autoajustado del carrusel porta crisoles, los resultados se puede apreciar las curvas del porcentaje de la masa respecto a la inicial, la pérdida de masa por efecto de la evaporación, volatilización y combustión (%/min) y la temperatura en función del tiempo (Mistretta et al., 2011).

### 2.5.3 Análisis Poder Calórico.

Es la cantidad de energía máxima en forma de calor que puede ser liberar por unidad de masa de un combustible, al ser sometido a una reacción química de oxidación mejor conocido como combustión (Castro, 2018).

El funcionamiento de este equipo es por una bomba calorimétrica se basa en que el calor desprendido en la combustión del producto objeto de estudio, y mide la elevación de la temperatura conociendo la masa de agua en la bomba (Figura 7), los resultados para la madera de climas fríos el poder calórico promedio es de 4 500 cal/g y para maderas latifoiadas de climas templados el poder calórico promedio es de 4 770 cal/g (Uceda, 2015).



**Figura 7:** Bomba calorimétrica de Emerson para la medición de poder calórico

### 2.6 Germinación de Semillas

La germinación es el proceso que se inicia con la toma de agua por la semilla seca (imbibición), una vez que la semilla se ha hidratado, comienza a activarse toda una serie de procesos metabólicos, se produce el crecimiento y emergencia de la radícula a través de las cubiertas seminales; una vez que la radícula ha roto las cubiertas seminales, se inicia el desarrollo de la plántula (Matilla, 2008).

Lehman (2011), afirma que la adición del biocarbón disminuye la resistencia a la tracción del suelo, esto permite una germinación más rápida de las semillas, así mismo Mora (2016), señala que el biocarbón con sus macronutrientes aporta en el crecimiento de las plantas, además al tener mayor porosidad alberga gran cantidad de agua, permitiendo que se concentre mayor humedad en el suelo.



**Figura 8:** Germinación de semillas de trigo

El biochar en el suelo provoca un incremento del pH, logrando un efecto positivo en suelos con baja fertilidad y alta acidez; sus propiedades físicas como: textura y estructura (porosidad), favorecen en la aireación (Escalante et al., 2016). Además aumenta la productividad de cultivos pobres en nutrientes, permite obtener altos rendimientos de cosecha con una dosis más baja de fertilización, se ha calculado que se podría llegar a reducir en un 12 % las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> (Demirbas, 2019).

Estudios recientes han explorado el potencial para usar el biochar como una enmienda del suelo en la agricultura; la adición de biochar en la germinación de plántulas, aumenta la longitud específica de la raíz; presenta un impacto positivo sobre el estado hídrico, aumentando la producción de biomasa aérea, lo que promueve un eficaz crecimiento y la producción vegetal (Moreno et al., 2001).

## **2.7 Evaluación de biochar en la germinación de trigo (*Triticum vulgare*)**

### **2.7.1 Hábito, crecimiento y desarrollo**

El trigo es un cultivo de estación fría, atraviesa por distintos estados y cada uno de ellos es marcado por la formación de partes específicas de la planta, para describir con más detalle todo el ciclo del cultivo del trigo se enfatiza de acuerdo a la escala de Zadoks como se detalla en la (Tabla 3) (Olmo, 2016). Durante la germinación (00 días a 09 días), las raíces seminales emergen del grano junto con el coleóptilo. El periodo de crecimiento (10 días a 19 días) comienza con la emergencia de la primera hoja a través de la superficie y continúa con el macollaje, (20 días a 30 días) con la formación de tallos laterales y se desarrollan más las raíces lo que posibilitan el establecimiento de cultivo.

**Tabla 3:** Los Estados de crecimiento del trigo según las escalas de Zadoks

<b>Escala</b>	<b>Descripción general</b>	<b>Observaciones</b>
Germinación		
00	Semilla Seca	
01	Comienzo de imbibición	
03	Fin de imbibición	Ninguna
05	Emergencia de la radícula	
07	Coleóptilo emergido	
09	Hoja en ápice del coleóptilo	
Crecimiento de la plántula		
10	1 hoja fuera coleóptilo	
11	1 hoja desarrollada	
12	2 hojas desarrolladas	
13	3 hojas desarrolladas	
14	4 hojas desarrolladas	50 % de la lámina
15	5 hojas desarrolladas	
16	6 hojas desarrolladas	
17	7 hojas desarrolladas	
18	8 hojas desarrolladas	
19	9 o más hojas desarrolladas	
Macollaje		
20	Tallo principal solo	
21	Tallo principal y 1 macollo	
22	Tallo principal y 2 macollos	
23	Tallo principal y 3 macollos	
24	Tallo principal y 4 macollos	
25	Tallo principal y 5 macollos	Ninguna
26	Tallo principal y 6 macollos	
27	Tallo principal y 7 macollos	
28	Tallo principal y 8 macollos	
29	Tallo principal y 9 macollos	
30	Alargamiento del tallo para el comienzo de una espiga	

El ciclo de vida de la planta de trigo puede ser dividida en dos períodos: primero, hace referencia al crecimiento vegetativo que inicia con el desarrollo de la estructura fotosintética hasta el desarrollo de la espiga, y la segunda fase de llenado del grano. Si bien son requeridas las mejores condiciones climáticas durante todo el ciclo de germinación (Moreno et al., 2011).

## **CAPÍTULO III**

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Área de estudio**

La zona de estudio para la obtención de los residuos forestales fue de los parques del cantón Cañar, ubicado en la altiplanicie de la cordillera de los andes región interandina del Ecuador, con una temperatura de 12 °C y a 3 160 ms.n.m. de altitud. Para la selección de la biomasa forestal se tomó en cuenta las especies forestales más abundantes como se observa en la (Figura 9).

La producción del biochar y los análisis (Elemental CHONS, termogravimétrico o proximal y poder calórico) para la caracterización química de la biomasa y biochar, se realizó en el laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina en Lima – Perú. En el cantón Cañar se elaboró las pruebas para evaluar la germinación y crecimiento de las plantas de trigo.

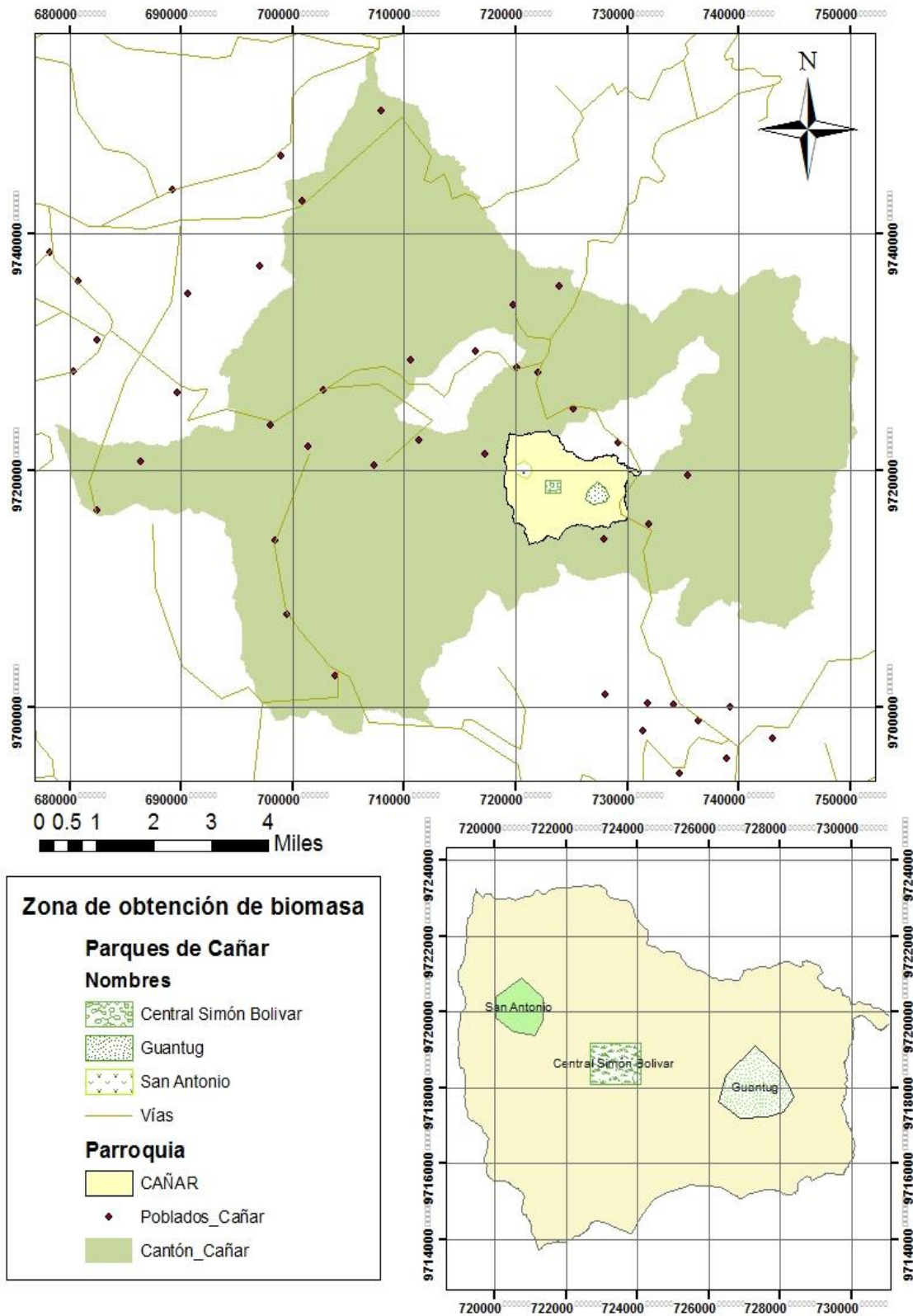


Figura 9: Zona de estudio para la recolección de biomasa residual

### 3.1 Población y muestra

#### 3.1.1 Población.

En la ciudad de Cañar existen tres parques representativos, los principales son: parque central Simón Bolívar, parque San Antonio y parque Guantug, mismos que fueron considerados como zonas para la selección de las muestras de poda.

A continuación, se dan a conocer la zonificación de los tres parques para la recolección de las muestras de las especies quinal (*Polylepis racemosa*) y ciprés (*Cupressus macrocarpa*).

##### a. Parque San Antonio.



**Figura 10:** Delimitación del parque San Antonio  
Fuente: Google Earth (2019)

En la tabla 4 se describe las coordenadas de ubicación del parque para la recolección de muestras.

**Tabla 4:** Ubicación de coordenadas del parque lineal San Antonio

Punto	Coordenadas	
	x	y
1	2°24'00.48" S	78°56'22.46" O
2	2°33'54.79" S	78°56'29.80" O
3	2°33'53.34" S	78°56'22.22" O
4	2°34'01.14" S	78°56'29.19" O

**b. Parque Guantug.**

En la figura 11 se aprecia la delimitación del parque, y la tabla 5 hace referencia a las coordenadas de ubicación del mismo.



**Figura 11:** Parque Guantug  
**Fuente:** Google Earth (2019)

**Tabla 5:** Ubicación de coordenadas del parque Guantug

Punto	Coordenadas	
	x	y
1	2°33'17.05" S	78°56'41.94" O
2	2°33'16.75" S	78°56'42.93" O
3	2°33'19.28" S	78°56'37.17" O
4	2°33'15.42" S	78°56'35.84" O

**c. Parque central Simón Bolívar.**

La figura 12 detalla el parque para la recolección de las muestras, y la tabla 6 hace referencia a las coordenadas de ubicación del mismo.



**Figura 12:** Delimitación del parque central Simón Bolívar  
**Fuente:** Google Earth (2019)

**Tabla 6:** Ubicación de coordenadas del parque central Simón Bolívar

Punto	Coordenadas	
	x	y
1	2°33'34.08" S	78°56'18.04" O
2	2°33'32.85" S	78°56'16.55" O
3	2°33'34.26" S	78°56'15.86" O
4	2°33'35.03" S	78°56'17.61" O

### 3.1.2 Sustratos

Las muestras de biomasa se escogieron de dos especies arbóreas más abundantes y comunes de los parques de la ciudad de Cañar (Tabla 7).

**Tabla 7:** Biomasa residual para la producción y caracterización del biochar

Nombre Común	Nombre Científico	Familia
Ciprés	<i>Cupressus macrocarpa</i>	<i>Cupressaceae</i>
Quinual	<i>Polylepis racemosa</i>	<i>Rosaceae</i>

## 3.2 Materiales y equipos

### 3.2.1 Materiales para la recolección de biomasa.

Se utilizó los siguientes materiales para la recolección de las muestras de biomasa de las especies de estudio en los parques anteriormente seleccionados (Tabla 8).

**Tabla 8:** Materiales para recolección de la biomasa

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>
Sierra de mano	1
Fundas Ziploc	24
Guantes	1
Balanza	1
Muestra de biomasa	12 kg

### 3.2.2 Materiales para el acondicionamiento de las muestras.

La preparación de las muestras, que sirvieron para realizar los análisis de la caracterización química de la biomasa y biochar, se utilizaron los materiales que se describen en la (Tabla 9).

**Tabla 9:** Materiales para el acondicionamiento de las muestras

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>
Vasos de precipitación	2	Horno termogravimétrico
Escofina (lima)	1	Balanza Analítica
Muestras de biomasa	40 g	

### 3.2.3 Materiales para la caracterización química en la biomasa.

Para la caracterización de la biomasa y biochar mediante el análisis elemental CHN (carbono total, hidrógeno total, y nitrógeno) se utilizó los siguientes materiales detallados en la (Tabla 10).

**Tabla 10:** Materiales y equipos para el análisis CHN

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>
Cápsulas de aluminio	3	
Espátula	1	Analizador Elemental
Porta muestra	3	
Balanza analítica	1	
Pinza	1	

### 3.2.4 Materiales y equipos para la caracterización química del oxígeno total.

Para el análisis del oxígeno en la biomasa y biochar se utilizaron las siguientes herramientas que se especifican en la (Tabla 11):

**Tabla 11:** Materiales para análisis de oxígeno total

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Cápsulas de aluminio	Analizador elemental
Mini - espátula	Módulo de Oxígeno
Patrón: Ácido benzoico	
Muestra de biochar	
Balanza analítica	
Pinza de plástico y metal	

### **3.2.5 Materiales para la caracterización química del azufre.**

La caracterización de la biomasa y biochar mediante el análisis elemental con el módulo de azufre se utilizó los siguientes materiales descritos en la (Tabla 12).

**Tabla 12:** Materiales para el análisis de azufre

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Barquillo de Zirconio	Analizador Elemental
Espátula	Módulo de Azufre
Muestra de biomasa y biochar	
Balanza analítica	

### **3.2.6 Materiales para el análisis termogravimétrico.**

La caracterización de la biomasa y biochar mediante el análisis termogravimétrico para humedad y materia volátil se utilizó los siguientes materiales que se muestran en la (Tabla 13).

**Tabla 13:** Materiales para el análisis de termogravimétrico

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Cápsula de porcelana	Horno termogravimétrico
Espátula	Estufa
Muestra de biomasa y biochar	
Balanza analítica	
Desecador	

### **3.2.7 Materiales para la germinación de las plantas de trigo.**

Para la ejecución de las pruebas de germinación se utilizó los materiales que se muestran en la (Tabla 14).

**Tabla 14:** Materiales para la germinación de semillas

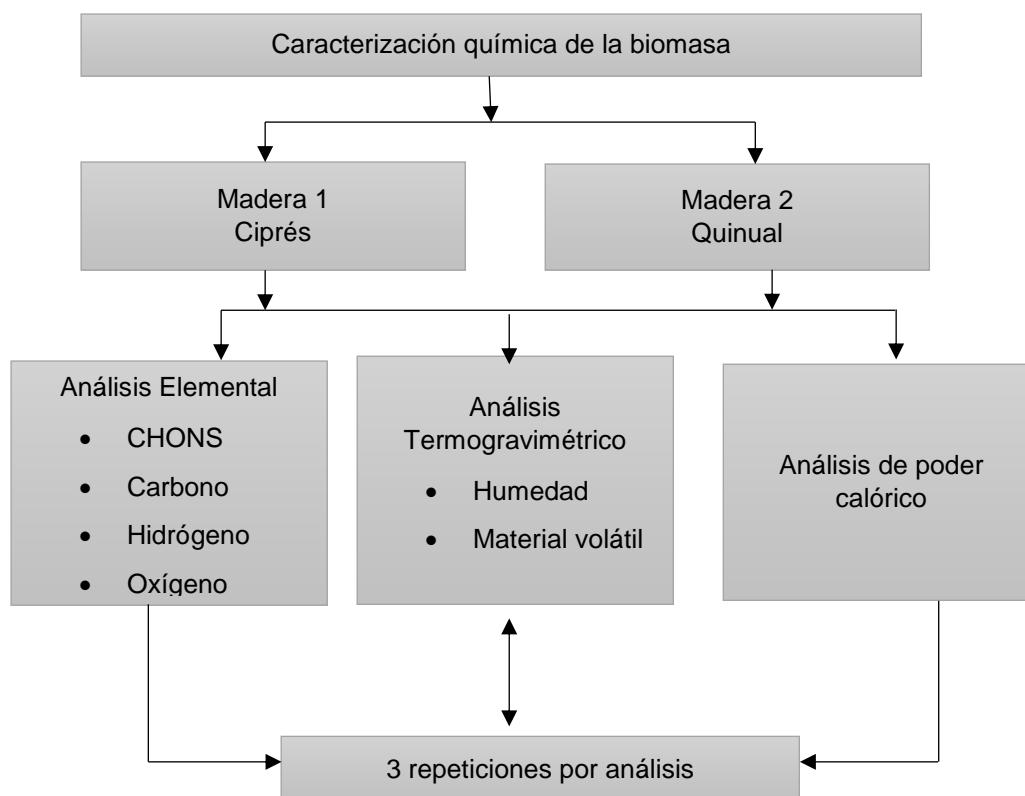
Materiales	Cantidad
Bandejas	28
Muestra de biochar	300 g
Semillas de trigo	336
Agua desionizada	
Probeta 100ml	1
Balanza analítica	1

### 3.3 Desarrollo Metodológico

La producción del biochar se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina de Lima - Perú. A continuación, se describe el diseño experimental aplicado para la caracterización química de la biomasa y biochar, así mismo se da a conocer la metodología utilizada para evaluar los efectos del mismo en el crecimiento de las plántulas de trigo.

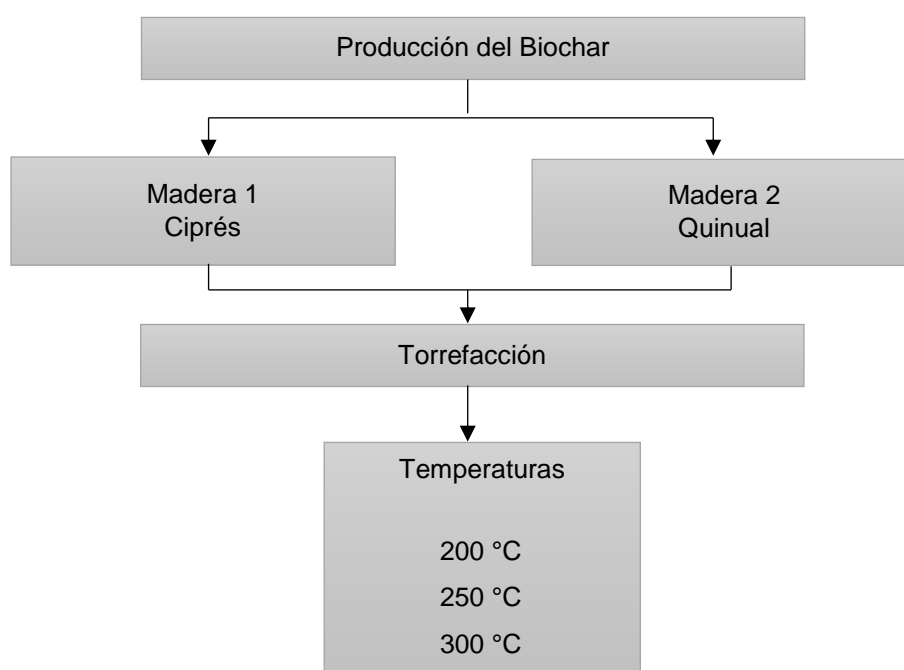
#### 3.3.1 Diseño Experimental.

La caracterización química de la biomasa a partir de quinual (M1) y ciprés (M2), se realizó mediante el análisis elemental CHONS, termogravimétrico y poder calórico, y así evaluar el contenido de la relación C/N, para identificar la viabilidad de producir biochar. A continuación, la (Figura 13) es un gráfico que detalla el procedimiento que se utilizó en la caracterización química de la biomasa y biochar.



**Figura 13:** Diseño experimental para la caracterización química de la biomasa y biochar

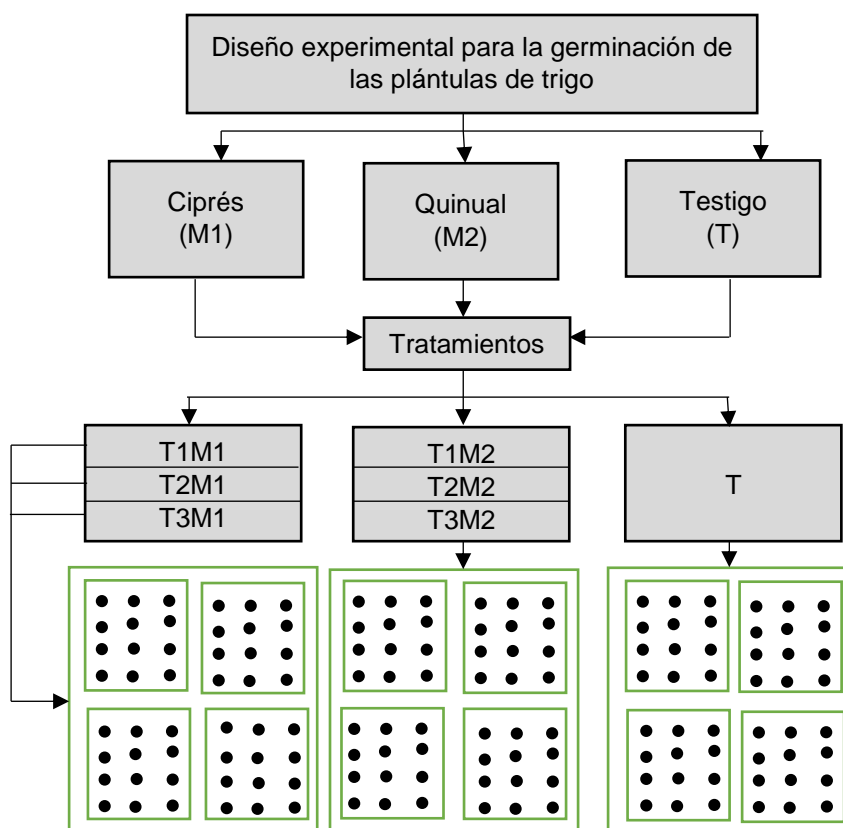
La obtención de biochar se realizó en base a la metodología realizada por (Bermeo, 2018), el cual utilizó el método de torrefacción a 3 temperaturas que fueron: 200 °C, 250 °C y 300 °C, con un tiempo de duración de 2 horas a 4 horas terminado el proceso y enfriamiento del horno termogravimétrico. En la (Figura 14) se detalla el diseño experimental para la producción de biochar.



**Figura 14:** Desarrollo metodológico para la producción de biochar

La metodología usada para evaluar el rendimiento del biochar en el proceso de germinación de las plántulas de trigo (*Triticum vulgare*), se realizó de acuerdo a (Gilces Reyna, 2014) para el cual se estableció un diseño experimental que consta de 3 tratamientos conformados de la siguiente manera: biochar de ciprés (M1) biochar obtenido a la temperatura de 200 °C (T1), 250 °C (T2), 300 °C (T3), de igual forma para el biochar a partir de quinual (M2), torrefactado a 3 temperaturas 200 °C (T4), 250 °C (T5) y 300 °C (T6), y un testigo (agua desionizada). Se consideró una sola dosis 1:10 (1 g de biochar por 10 ml de agua desionizada) en base al autor (Iglesias, 2018) en su investigación realizado con biochar de eucalipto para determinar el rendimiento de las semillas de maíz. Para cada tratamiento se realizó 4 repeticiones, obteniendo 28 unidades experimentales. La medición de la tasa de crecimiento semanal de la raíz y el

tallo del trigo se realizó de acuerdo con el autor Arévalo (2019). A continuación la (Figura 15) representa el diseño experimental para la germinación de semillas.



**Figura 15:** Desarrollo metodológico para la germinación de semillas

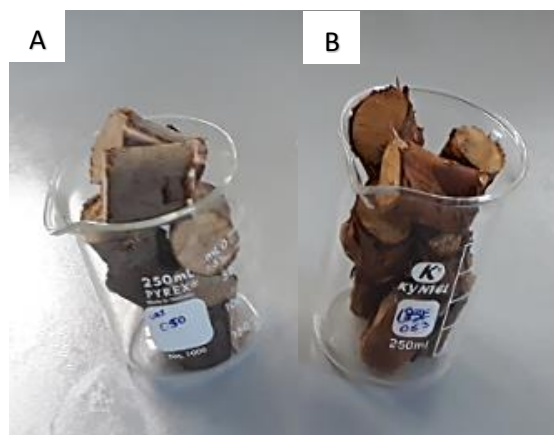
### 3.4 Metodología para la caracterización química de la biomasa

La caracterización de la biomasa que comprende de 3 análisis: Elemental CHONS, termogravimétrico y poder calórico. La metodología que se utilizó fue de acuerdo con el estudio realizado por Bermeo (2018), en donde manifiesta que la composición de la biomasa varía dependiendo de la estructura según la materia prima empleada. A continuación se detallan los procedimientos para realizar los análisis anteriormente mencionados.

#### 3.4.1 Recolección y acondicionamiento de la biomasa residual.

Para la toma de muestras de las podas de las especies quinual y ciprés se efectuó en base al protocolo realizado por el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria la Molina, el cual establece que deben tener una pulgada de longitud alcanzando uniformidad de las mismas como se detalla en la (Figura 16).

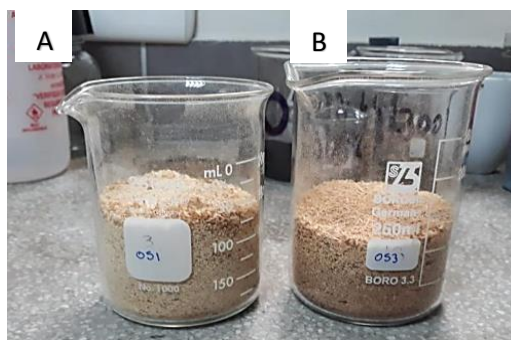
Para el acondicionamiento de las muestras se realizó de acuerdo con la Norma ASTM E1757- 01(07) Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis.



**Figura 16:** Biomasa residual de ciprés (A) y quinal (B)

### 3.4.2 Preparación de muestras para laboratorio.

Las muestras de biomasa fueron secadas en una estufa a 105 °C durante 12 horas hasta lograr un peso constante. Luego de que las muestras se hayan secado se limó con el fin de estandarizar el tamaño de la materia prima obteniendo 40 g por especie (Figura 17).



**Figura 17:** Limaduras de ciprés (A) y quinal (B)

### 3.4.3 Análisis CHN, determinación del carbono (C), hidrógeno (H) Totales y nitrógeno (N).

La metodología para el análisis Carbono, Hidrógeno, Oxígeno totales, se realizó mediante el analizador elemental LECO CHN-2000, en base a la norma ASTM D5373/ Standard Test Method for determination of Carbón, Hydrogen and Nitrogen in analysis samples of Coal and Carbón in Analysis Samples of Coal and Coke, en donde se establece que las muestras ya sea de biomasa o biochar deben reducirse y dividirse

según el tamaño/masa especificado, los pesos para el análisis de carbono e hidrógeno varían entre 0.0800 g a 0.0900 g, De la misma manera se realizó el ensayo para conocer el contenido de nitrógeno asociado con los nitritos.

Se pesó una cantidad de la muestra con ayuda de la espátula, el peso varía entre 0.0800 g a 0.15 g, como se presenta en la (Figura 18), se realizó 3 repeticiones por tipo de biomasa residual empleada.



**Figura 18:** Balanza analítica para el pesaje de la muestra

Con la ayuda de la pinza se dobló la envoltura de aluminio y se coloca en el porta muestra, luego se colocó en el carrusel para que empiece el análisis CHN.

#### **3.4.4 Determinación de oxígeno total.**

Para medir el porcentaje de oxígeno presente en la biomasa. Se realizó en un micro analizador (Figura 19), mediante combustión con oxígeno puro de la muestra de biomasa o biocarbón a 1 050 °C.



**Figura 19:** Módulo para el análisis del contenido de oxígeno

Se colocó la cápsula de estaño en una micro balanza como manifiesta la (Figura 20), y se pesó 2 mg de la muestra (biomasa o biochar) previamente mezclada.



**Figura 20:** Micro balanza para pesar la muestra de biomasa o biochar

Se colocó en el carrusel para el respectivo análisis (Figura 21), es así como se caracteriza el oxígeno de la biomasa, de igual manera se realiza el ensayo para biochar.



**Figura 21:** Colocación de las muestras para iniciar con el análisis

### **3.4.5 Determinación del contenido de Azufre.**

Para la determinación de azufre, asociado con el dióxido de azufre, se realizó en base a la norma ASTM D4239 (Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion) para el análisis de azufre para ello las muestras de biomasa y biochar los pesos para este ensayo varían entre 0.1500 g a 0.1600 g, previamente trituradas a temperaturas de oxidación de  $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta que se termine la oxidación, con una velocidad de calentamiento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , bajo una corriente de nitrógeno de  $100\text{ ml}/\text{min}$ .

Se pesó la muestra en una balanza analítica alrededor de 0,1600 g en los barquillos de zirconio (Figura 22).



**Figura 22:** Pesaje de la muestra para el análisis de Azufre

Se ubicó la muestra (biomasa o biochar) en un barquillo con la ayuda de una espátula extendiendo en la base del crisol (Figura 23), antes de colocar la muestra se debe homogenizar.



**Figura 23:** Preparación de muestras de biochar

Se instaló el barquillo de zirconio en la puerta del horno (Figura 24), con la ayuda de una lanza se introdujo el crisol hasta que llegue a tope del módulo y se combustione por completo. Para este análisis se realizó 3 repeticiones.



**Figura 24:** Puerta del horno para el análisis de azufre

### **3.4.6 Análisis termogravimétrico (humedad y contenido de materia volátil).**

La determinación de la humedad y contenido de material volátil se realizó en el horno termogravimétrico, en base a la Norma ASTM D3173-17, (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke).

En caso de obtener valores altos de humedad se somete a otro proceso de secado para el cual se colocó 1 g de biomasa en un crisol, y se introdujo en una estufa a 105 °C, durante 1 hora, luego se coló en un desecador hasta que se enfríe y se volvió a pesar.

### **3.4.7 Análisis de poder calórico superior.**

La metodología para el poder calórico se desarrolló en base a la norma ASTM, ASTM D 3174-02, 202; ASTM D 5142-02<sup>a</sup>,2003 Y ATM D7582, 2012, mediante el analizador calorimétrico, para la determinación elemental por combustión/fusión de materiales orgánicos e inorgánicos, termo gravimetría, calorimetría de las diversas muestras a analizar, para el cual se debe preparar la muestra tamizada o peletizada, los rangos para las muestras son entre 0.2021 g a 0.2500 g. A continuación se detallan los procedimientos que comprende este ensayo.

Se pesó la muestra en una balanza analítica, previamente tamizada o peletizada como se visualiza en la (Figura 25).



**Figura 25:** Peso de la muestra para el análisis de poder calórico

Se instaló el crisol con la muestra en la estación de trabajo y se colocó un hilo de algodón, este hilo debe tener contacto con la muestra contenida en el crisol (Figura 26).



**Figura 26:** Colocación de la muestra en la estación de trabajo

Se ubicó el crisol con la muestra en la bomba calorimétrica para llenarla con oxígeno a presión como se muestra en la (Figura 27).



**Figura 27:** Bomba calorimétrica para análisis de poder calórico

La bomba calorimétrica se colocó en el módulo de poder calórico e inició la combustión, el tiempo de duración para este análisis fue de 2 min aproximadamente (Figura 28).



**Figura 28:** Módulo de poder calórico

### 3.5 Relación C/N

Se calculó la relación carbono/nitrógeno (C/N) de los dos tipos de biomasa (ciprés y quinual) en base a la metodología empleada por Bermeo (2018), para determinar si la biomasa residual puede ser transformada en energía, biochar o compost.

### 3.6 Producción de Biochar por el método de Torrefacción

Se empleó el método de torrefacción a 3 temperaturas: 200 °C, 250 °C y 300 °C; con el uso de un horno termogravimétrico (Figura 29), este equipo tiene opción de analizar 20 muestras distintas, el proceso dura aproximadamente 4 horas, y enfriamiento de 2 horas.



**Figura 29:** Horno Termogravimétrico para la producción de biochar

Se pesó las muestras, para este caso se introdujeron en el horno 10 crisoles con biomasa de ciprés, 9 crisoles con biomasa de quinual, y un testigo (Figura 30). Este procedimiento se repite a temperaturas de 250 °C y 300 °C por sustrato.



**Figura 30:** Colocación de las muestras de biomasa en el horno

Los pesos de la biomasa de ciprés y quinal, para el proceso de torrefacción a 200 °C, vienen registrados en las siguientes tablas 15 y 16:

**Tabla 15:** Peso de la biomasa residual de ciprés para la obtención de biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	92.00
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	91.59
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	91.38
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	103.34
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	90.92
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	92.44
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	91.75
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	94.19
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_1	93.74
<b>Total</b>		<b>841.35</b>

**Tabla 16:** Peso inicial de la biomasa de quinal para la obtención de biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	93.64
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	93.03
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	93.8
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	92.46
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	93.23
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	93.35
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	91.14
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	91.74
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_1	95.11
<b>Total</b>		<b>837.5</b>

Los pesos de las muestras de biomasa para el proceso de torrefacción a la temperatura de 250 °C de temperatura, vienen registrados en las tablas 17 y 18:

**Tabla 17:** Peso de la biomasa residual de ciprés para obtener biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	108.09
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	102.32
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	101.83
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	96.83
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	99.53
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	91.46
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	91.63
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	94.22
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_2	94.13
<b>Total</b>		<b>880.0</b>

**Tabla 18:** Peso de la biomasa residual de quinual para obtener biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	98.17
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	91.59
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	90.19
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	99.94
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	91.13
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	91.72
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	100.6
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	97.35
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_2	91.59
<b>Total</b>		<b>852.28</b>

Los pesos de la biomasa para el proceso de torrefacción a 300 °C de temperatura, vienen registrados en las tablas 19 y 20:

**Tabla 19:** Peso de la biomasa de ciprés para obtener biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	90.88
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	95.51
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	91.06
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	95.85
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	91.94
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	91.02
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	95.13
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	91.38
Tube_(02/2018)_0051	Torrefacción_3	91.91
<b>Total</b>		<b>834.68</b>

**Tabla 20:** Peso de la biomasa de quinual para obtener biochar expresado en g

<b>Código de Laboratorio</b>	<b>Método</b>	<b>Masa inicial</b>
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	95.61
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	90.24
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	90.41
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	90.26
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	94.55
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	90.62
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	90.44
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	93.72
Tube_(02/2018)_0054	Torrefacción_3	95.22
<b>Total</b>		<b>831.07</b>

En el software del equipo se fijó la temperatura de producción, luego inició con el análisis de humedad y material volátil, mientras se evaluó estos parámetros la biomasa pierde su rendimiento másico hasta el punto que el horno alcance la temperatura del método de torrefacción, finalmente se enfrió el horno por 2 horas aproximadamente (Figura 31) y se obtuvo el biochar.



**Figura 31:** Horno termogravimétrico para el análisis de humedad y producción de biochar

### 3.6.1 Cálculo del rendimiento del biochar.

Se calculó el rendimiento másico de acuerdo con la fórmula propuesta por Bermeo (2018) :

$$R = \frac{W_o}{W_f} \times 100$$

Donde:

R: Rendimiento másico (%)

$W_o$  : Peso de la muestra sin torrefactar (kg)

$W_f$  : Peso de la muestra torrefactada (kg)

### 3.7 Caracterización química del biochar

La caracterización del biochar se realizó mediante los análisis elemental CHONS, termogravimétrico y poder calórico. Los métodos usados se describen en la (Tabla 21), los procedimientos se realizaron de acuerdo con lo propuesto para la caracterización de biomasa.

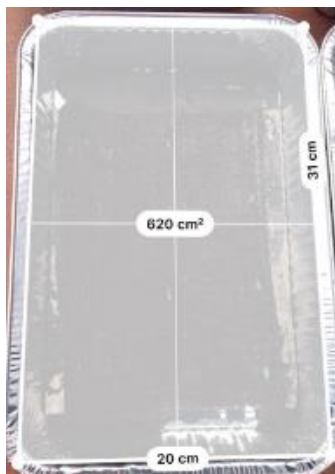
**Tabla 21:** Tipos de análisis para la caracterización de biochar

Análisis	Norma/Método
<ul style="list-style-type: none"><li>• Carbono</li><li>• Hidrógeno</li><li>• Oxígeno</li><li>• Nitrógeno</li></ul>	ASTM D5373/ Método de prueba estándar para la determinación instrumental de carbono, hidrógeno y nitrógeno en muestras de carbón
Azufre	ASTM D4239/ Método de prueba estándar para el azufre en la muestra de análisis de carbón y coque utilizando la combustión en hornos termogravimétrico
Poder Calórico	ASTM D5865/ Método de prueba estándar para el valor calorífico bruto de carbón y coque

### 3.8 Metodología para la germinación de las semillas de trigo

Para determinar la tasa de crecimiento de las plántulas de trigo (*Triticum vulgare*), se efectuaron pruebas de germinación con 7 tratamientos: biochar de ciprés obtenido a 200 °C (I), 250 °C (II) y 300 °C (III), de igual manera para la especie quinal y un testigo, obteniendo 28 unidades experimentales, la etapa de germinación se realizó en el cantón Cañar.

Se utilizaron 28 bandejas o unidades de evaluación de 20 cm x 31 cm, que conformaron los tratamientos del ensayo para el cultivo de trigo. Las características de 1 bandeja utilizada para el experimento se detallan en la (Figura 32).



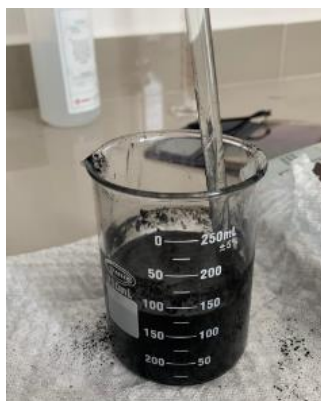
**Figura 32:** Bandeja para la germinación de semillas de trigo

La dosis que se aplicó para los tratamientos se muestra en la (Tabla 22).

**Tabla 22:** Dosis para las diluciones aplicadas en la germinación de trigo

<b>Variables</b>	<b>Fase Sólida Biochar (g)</b>	<b>Fase líquida agua desionizada (ml)</b>
Ciprés	1	10
Quinual	1	10
Testigo	1	10

Se preparó las diluciones en base a la metodología utilizada por el autor (Iglesias, 2018), que consistió en moler el biochar en un molino, para obtener un producto fino. En un vaso de precipitación se agregó 10 ml de agua desionizada con la mezcla de 1 g de biochar como se detalla en la (Figura 33) este procedimiento se realizó para los 3 tratamientos, y un testigo (10 ml de agua desionizada).



**Figura 33:** Preparación de las diluciones 1:10

Se colocó las diluciones sobre un papel absorbente para mantener la humedad en las 28 bandejas. Además se utilizó 336 semillas, distribuidas de 12 por bandeja con una separación de 3 cm. Para los tratamientos se asignó las siguientes codificaciones que se detallan en la (Tabla 23).

**Tabla 23:** Codificación para los tratamientos del biochar

<b>Especie</b>	<b>Temperatura de producción</b>	<b>Codificación</b>
Ciprés (M1)	200 °C (T1)	T1M1
	250 °C (T2)	T2M1
	300 °C (T3)	T3M1
Quinual (M2)	200 °C (T4)	T4M2
	250 °C (T5)	T5M2
	300 °C (T6)	T6M2

A continuación en la (Figura 34) representa el tratamiento del biochar de ciprés producido a 200°C (T1M1).



**Figura 34:** Tratamiento del biochar de ciprés (T1M1)

En la (Figura 35) se muestra el tratamiento del biochar a partir de ciprés obtenido a 250 °C de temperatura (T2M1).



**Figura 35:** Tratamiento del biochar de ciprés (T2M1)

En la (Figura 36) se muestra el tratamiento del biochar a partir de ciprés obtenido a la temperatura de 300 °C (T3M1).



**Figura 36:** Tratamiento del biochar de ciprés (T3M1)

La (Figura 37) se observa los tres tratamientos conformados por 4 bandejas, para el biochar a partir de la especie quinal a 200 °C (T4M2).



**Figura 37:** Tratamientos del biochar de quinal (T4M2)

La (Figura 38) se observa los tres tratamientos conformados por 4 bandejas, para el biochar a partir de la especie quinual a 250 °C (T5M2).



**Figura 38:** Tratamientos del biochar de quinual (T5M2)

La (Figura 39) se observa los tres tratamientos conformados por 4 bandejas, para el biochar a partir de la especie quinual a 300 °C (T6M2).



**Figura 39:** Tratamientos del biochar de quinual (T6M2)

La (Figura 40) se observa el testigo (T) conformados por 4 bandejas, constituido por agua desionizada.

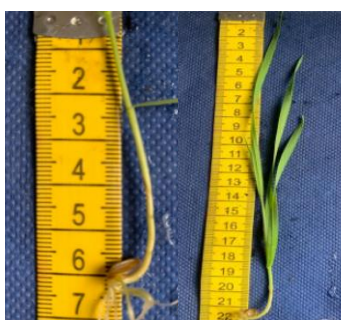


**Figura 40:** Testigo para las pruebas de germinación

Para determinar la tasa de crecimiento semanal de las plántulas de trigo, se midió con una cinta métrica el crecimiento de la raíz en cm, como se detalla en la (Figura 41) de la misma forma se registró la longitud del tallo (Figura 42).



**Figura 41:** Medición de la raíz de la plántula de trigo



**Figura 42:** Medición del tallo de la plántula de trigo

En la (Tabla 24) se expone el registro de la tasa de crecimiento de la raíz en la primera semana con aplicación de los siete tratamientos. Se realizó un conteo de manera visual, anotando el número de plántulas germinadas por semana en cada una de las bandejas de acuerdo con el autor (Abenza, 2012). De esta forma se registraron los valores semanales del crecimiento de las plántulas de trigo durante 30 días. Por otro lado, los resultados obtenidos en la semana dos, tres y cuatro se expondrán en la parte de anexos. De igual manera se registró para la tasa de crecimiento del tallo.

**Tabla 24:** Datos del crecimiento semanal de la raíz con todos los tratamientos en la primera semana de germinación expresado en cm

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T1M1	T1	1	1.4	1	1.2	1.5
			2	1.3	1.3	1.4	1.5
			3	1.5	1.5	1.7	1.4
			4	1.7	1.5	1.5	1.2
			5	1.5	1.3	1.7	1.4
			6	1.2	1.7	1.5	1.7
			7	1.7	1.2	1.5	1.3
			8	1.5	1.5	1.7	1.5
			9	1.5	1.7	1.2	1.7
			10	1	1.6	1.3	1.4
			11	1.5	1.3	1.5	1.3
			12	1.3	1.3	1.2	1.4
	T1M2	T2	1	1	1.5	1.5	1.3
			2	1.5	1	1.5	1
			3	1.3	1.7	1	1.8
			4	1	1.5	1.3	1.4
			5	1.4	1.5	1	1.4
			6	1.5	1	1.7	1.2
			7	1.8	1.1	1	1.5
			8	1	1.4	1.5	1.1
			9	1.3	1.5	1.7	1.4
			10	1	1.7	1	1
			11	1.7	1	1.5	1
			12	1.5	1.6	1	1.4
	T2M1	T3	1	2	2.5	2	2
			2	2.3	2	2.5	2.3
			3	2	2.3	2	2
			4	2.2	2.7	2.2	2.2
			5	2.1	2.03	2	2.6
			6	2.4	2	2.7	2.5
			7	2.3	2.5	2.5	2
			8	2	2.1	2.2	2.3
			9	2.3	2	2.5	2
			10	2.3	2.5	2.3	2
			11	2	2.3	2	2.5
			12	2.4	2	2.1	2.5
	T2M2	T4	1	1	1.5	1	1.3
			2	1.5	1	1	1
			3	1.5	1.4	1.3	1.5
			4	1	1	1	1
			5	1.5	1.5	1.4	1.5
			6	1	1.2	1.5	1
			7	1.7	1.5	1.5	1.3
			8	1.5	1.4	1	1.2
			9	1.4	1.3	1.5	1.5
			10	1	1.2	1	1.1
			11	1.5	1	1.6	1.7
			12	1	1.4	1.25	1
T3M1	T5	1	1.3	1.2	1	1	
		2	1.5	1.5	1.2	1.3	
		3	1	1	1.2	1.5	
		4	1.12	1	1	1	
		5	1.2	1	1.4	1.5	
		6	1.3	1.5	1.5	1	

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
			7	1	1.3	1	1.5
			8	1.2	1.2	1.2	1.6
			9	1.4	1.5	1.3	1.2
			10	1.3	1.4	1.4	1
			11	1	1.7	1	1
			12	1.6	1.2	2	1.5
			1	2.5	2	2.4	2.1
			2	2	2.1	2.4	2.4
			3	2.4	2.5	2.5	2
			4	2.5	2.6	2	2.5
			5	2.7	2.6	2.4	2.3
	T3M2	T6	6	2	2.6	2.6	2.6
			7	2.4	2.7	2.2	2.7
			8	2	2.7	2.8	2.7
			9	2.4	2	2.3	2.4
			10	2	2.4	2	2.1
			11	2.5	2.4	2.5	2
			12	2.5	2	2	2.5
			1	1	1	1.5	1.4
			2	1.5	1.5	1	1.5
			3	1	1.3	1	1
			4	1	1.5	1.5	1
			5	1.6	1.2	1.2	1.1
	Testigo	T7	6	1	1.2	1.5	1.5
			7	1.1	1.3	1	1
			8	1.6	1	1.6	1
			9	1	1	1.4	1.4
			10	1.1	1.2	1	1
			11	1.4	1.4	1	1
			12	1	1.4	1	1.4

### 3.9 Análisis Estadístico

Para la comparación de las propiedades y características de las muestras de biomasa y biochar obtenido a partir de 2 residuos vegetales (ciprés y quinal). Se utilizó el análisis descriptivo mediante los indicadores estadísticos de tendencia central (Media y Mediana) y los indicadores de dispersión como: la desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE). Así también se realizaron análisis gráficos para dar a conocer el porcentaje de cada ensayo realizado durante la experimentación.

Posteriormente se realizó el análisis de variancias (Anova) de doble vía, la normalidad de los residuales y la homocedasticidad (igualdad de varianzas) para determinar las diferencias significativas entre la tasa promedio de crecimiento semanal de la raíz y tallo en las plántulas de trigo. También se realizó gráficos para comparar la interacción de la tasa de crecimiento semanal. Los cálculos se realizaron en el programa estadístico RStudio.

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Caracterización química en la biomasa residual

Los resultados del análisis elemental realizado en la biomasa de ciprés y quinal proveniente de las podas, están descritos en la (Tabla 25) donde se muestra el porcentaje de las variables químicas: carbono total, hidrógeno total, oxígeno total, nitrógeno y azufre. En este análisis se realizaron 3 repeticiones.

**Tabla 25:** Resultados del análisis elemental en los sustratos

Especies	Variable Química	Repeticiones		
		I	II	III
Ciprés	Carbono	45.32	44.90	45.15
	Hidrógeno	6.48	6.37	6.50
	Oxígeno	22.25	23.97	23.37
	Nitrógeno	0.32	0.32	0.32
	Azufre	0.15	0.16	0.15
Quinal	Carbono	45.92	45.27	45.07
	Hidrógeno	6.49	6.38	6.33
	Oxígeno	22.34	22.57	24.95
	Nitrógeno	0.60	0.61	0.53
	Azufre	0.18	0.17	0.15

A continuación en la (Tabla 26) se describen los indicadores descriptivos<sup>1</sup> obtenidos a partir de los resultados detallados en la (Tabla 25) por cada variable química, para los dos tipos de biomasa (ciprés y quinal).

**Tabla 26:** Resultados del análisis descriptivo de la caracterización química en los sustratos

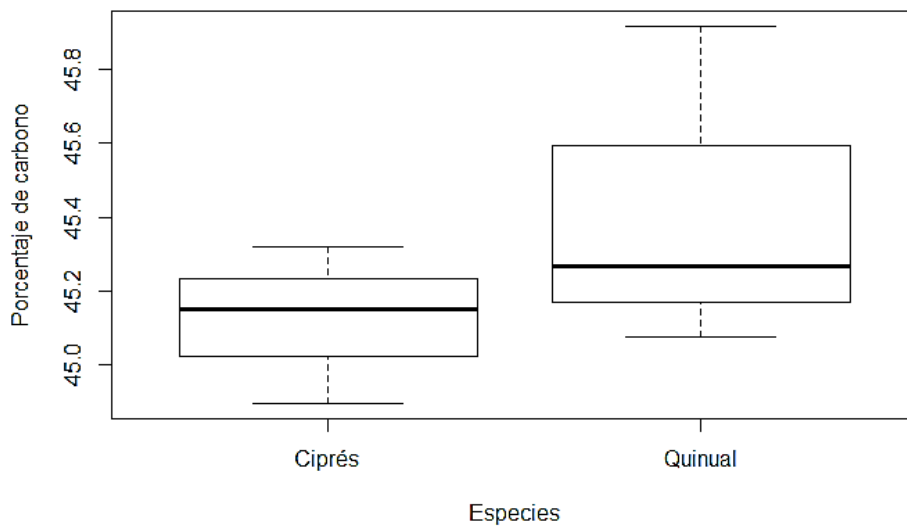
Sustratos	Variable Química	Media	Mediana	DE	CV	EE
Ciprés	Carbono	45.12	45.14	0.21	0.47	0.12
	Hidrógeno	6.45	6.48	0.07	1.11	0.04
	Oxígeno	23.195	23.368	0.871	3.757	0.503
	Nitrógeno	0.321	0.320	0.003	0.941	0.002
	Azufre	0.156	0.152	0.006	3.687	0.003
Quinal	Carbono	45.42	45.27	0.44	0.98	0.26
	Hidrógeno	6.40	6.38	0.08	1.26	0.046
	Oxígeno	23.287	22.565	1.446	6.208	0.83
	Nitrógeno	0.581	0.599	0.042	7.162	0.02
	Azufre	0.213	0.211	0.023	10.70	0.01

<sup>1</sup> Indicadores descriptivos: Estadísticos de tendencia central (Media y Mediana) y los indicadores de dispersión como la desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE).

#### 4.1.1 Carbono total.

De acuerdo con los análisis descriptivos realizados en la biomasa residual de ciprés y quinal, se encontró la media matemática para la variable carbono, el cual en la especie arbórea ciprés se obtuvo un valor promedio de 45.12 % con un error estándar de 0.12, que pertenece a un intervalo estimado de [44.99 %, 45.24 %]. De acuerdo con el estudio realizado por Urien (2013) encontró el 51.21 % de carbono total en biomasa de abeto, este valor es poco similar debido a las propiedades físico-químicas de este residuo. Mientras que en la especie arbórea quinal presentó un valor promedio de 45.42 % con un error estándar de 0.26, que corresponde a un intervalo de [45.16 %, 45.67 %]. Estos resultados se compararon con los resultados del análisis próximo de la biomasa de eucalipto realizado en el estudio de (Garzón, 2018) donde encontró el 45.43 % , este valor es similar a los resultados obtenidos.

La (Figura 43) representa el porcentaje de carbono total encontrados en el biochar de ciprés y quinal, elaborado con los datos de la (Tabla 25), en donde se comprueba que la biomasa de ciprés es la mejor por que presenta menor promedio y menor variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación.

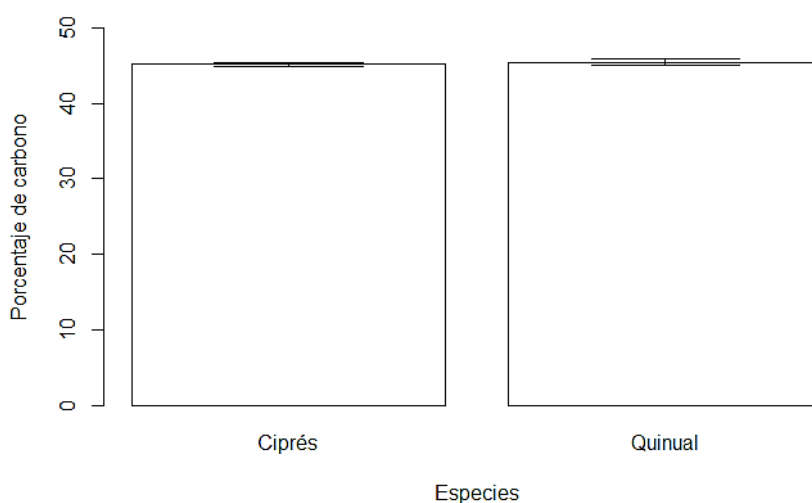


**Figura 43:** Contenido de carbono en la biomasa de ciprés y quinal

Según estudios realizados por García et al., (2016) manifiesta que las estimaciones de la cantidad de carbono almacenado para biomasa se asume generalmente el valor de la fracción de carbono en materia seca de un 50 %, No obstante, la variabilidad del contenido de carbono según la especie y tejido del árbol, el contenido de carbono en

componentes leñosos dependen de la proporción de compuestos como la lignina y minerales inorgánicos.

La (Figura 44) representa el error estándar que se ha cometido durante el proceso de caracterización química del carbono en los sustratos de ciprés y quinal, este gráfico se construyó con los resultados del análisis descriptivo manifestados en la (Tabla 25). En donde se comprueba que la especie ciprés presenta menor margen de error durante la experimentación.

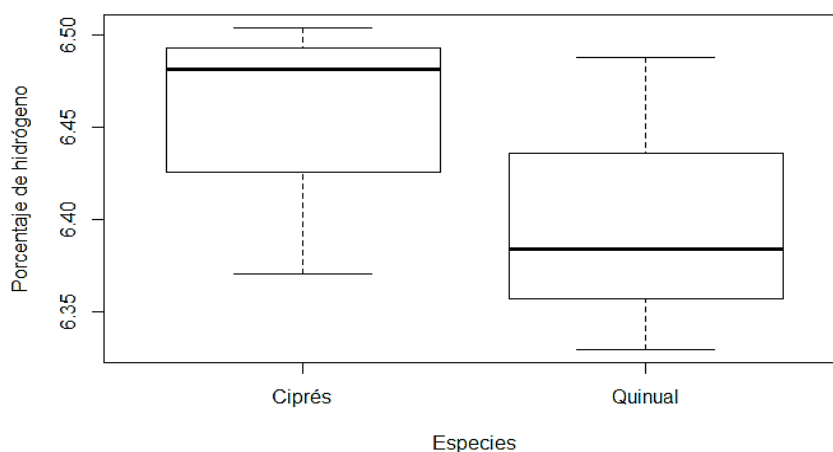


**Figura 44:** Error Estándar del Contenido de Carbono en la biomasa residual Ciprés y Quinal

#### 4.1.2 Hidrógeno total.

El contenido de hidrógeno para la especie arbórea ciprés muestra un valor promedio de 6.45 % con un error estándar de 0.04, que resulta en intervalos de [6.41 %, 6.49 %]. Sin embargo la especie arbórea quinal presenta un promedio de 6.40 % con una desviación de 0.046, que corresponde a un intervalo de [6.35 %, 6.44 %]. En donde al comparar las 2 especies arbóreas, el quinal es de menor promedio y poca variabilidad en la experimentación. Entonces la especie arbórea quinal es la mejor por su poca variabilidad en la experimentación y bajo contenido, lo que implica que se puede torrefactar a temperaturas altas. La mayorías de las biomásas leñosas están constituidas por el 50 % de carbono y el 6 % de hidrógeno de acuerdo con el estudio realizado por (Carmona, 2015). El C, H y O constituyen los componentes principales de la sustancia vegetal, estos elementos tienen importancia fundamental en aplicaciones bioenergéticas de la biomasa.

La (Figura 45) representa el porcentaje de hidrógeno total encontrado en la biomasa de ciprés y quinal, elaborado con los datos de la (Tabla 25), en donde se comprueba que la especie ciprés presenta menor variabilidad de datos, mientras que para quinal los resultados son de mayor esparcimiento durante la experimentación.



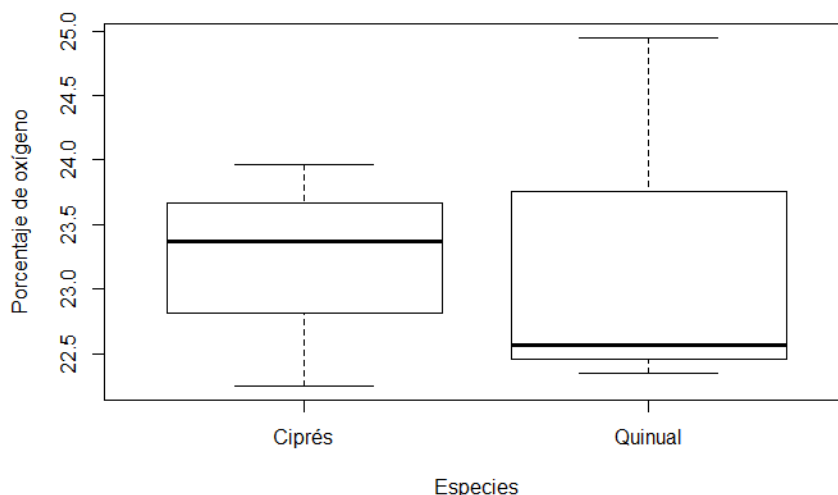
**Figura 45:** Porcentaje de hidrógeno en las especies ciprés y quinal

#### 4.1.3 Oxígeno total.

En cuanto a la variable oxígeno en la especie arbórea ciprés demuestra un valor promedio de 23.19 % con un error estándar de 0.50, que resulta en un intervalo de [22.69 %, 23.69 %]. Romo & Cañas (2011) al caracterizar madera de café encontró 36.3 % de igual manera descubrió el 43.9 % de oxígeno en aserrín de roble. El oxígeno (O) se encuentra oxidando de forma parcial al carbono e hidrógeno, este proceso contribuye durante la transformación termoquímica.

El contenido de C e H favorecen positivamente en el poder calorífico, mientras que el contenido de O lo hace de modo negativo (Carmona, 2015). Por otro lado para la especie arbórea quinal se encontró un valor promedio de 23.28 % con un error estándar de 0.83, que corresponde a un intervalo de [22.45 %, 24.11%]. Así mismo los autores (Acelas & Ruiz, 2010) caracterizaron el oxígeno en biomasa de pino encontrando el 54.7 %. Este valor varía de acuerdo a la composición química de los residuos empleados. El cual se comprueba que entre las 2 especies, el ciprés es el mejor por su menor promedio y poca variabilidad en la experimentación.

La (Figura 46) representa el porcentaje de oxígeno total encontrados en la biomasa de ciprés y quinal, elaborado con los datos de la (Tabla 25), en donde se demuestra que la especie ciprés presenta menor variabilidad en la dispersión de datos y es de bajo contenido, por lo que es factible para ser convertida en biochar.



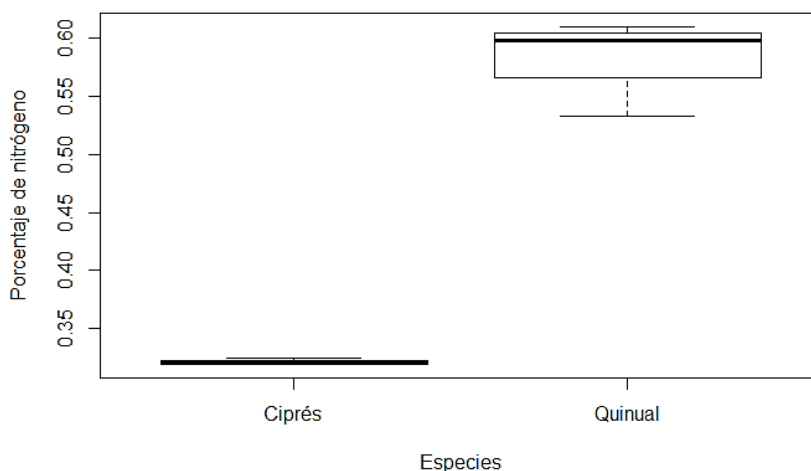
**Figura 46:** Porcentaje de oxígeno en las especies ciprés y quinal

#### 4.1.4 Nitrógeno.

El nitrógeno para la especie arbórea ciprés presenta un valor promedio de 0.321 % con un error estándar de 0.002, que resulta en un intervalo estimado de [0.319 %, 0.323 %]. Así mismo en el estudio realizado por (Urien, 2013) al caracterizar madera de abeto encontró el 0.23 %, este valor es similar debido a que la metodología utilizada fue la misma. Mientras que, para la especie quinal su valor promedio es de 0.581 % con un error estándar de 0.02, que corresponde a un intervalo de [0.561 %, 0.601 %]. De acuerdo con (Garzón, 2018) al identificar el nitrógeno en biomasa de eucalipto encontró el 0.75 %, este resultado es similar debido a que la composición química del eucalipto es madera dura al igual que el ciprés y quinal.

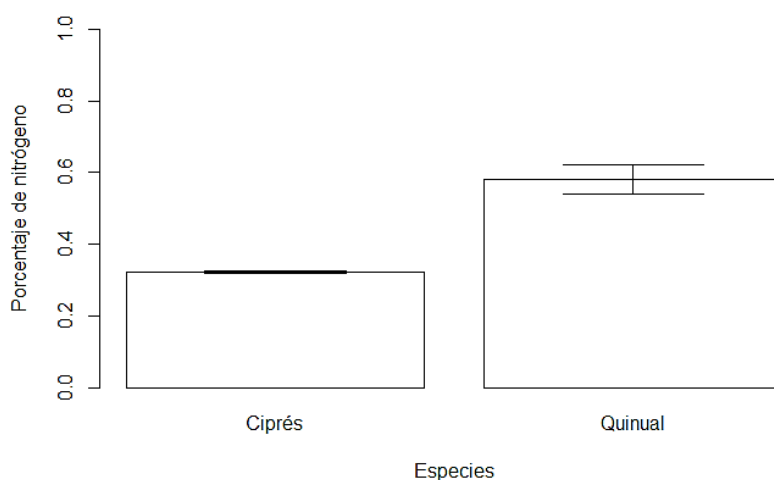
Por lo tanto se asume que al comparar las 2 especies, el ciprés presenta menor promedio y variabilidad en la experimentación. Este tipo de biomasa es viable para ser utilizada en la transformación de biochar, ya que al combustionar los gases derivados de este compuesto serán menores, lo que implica menor contaminación de óxidos de nitrógeno hacia la atmósfera.

La (Figura 47) expone el contenido de nitrógeno en porcentaje, este gráfico fue construido con los datos de la (Tabla 25), en donde se visualiza que al comparar las 2 especies son de bajo contenido, mientras que en la experimentación de datos la variabilidad durante la experimentación es notable.



**Figura 47:** Contenido de nitrógeno en las especies ciprés y quinual

En la (Figura 48) se visualiza el error estándar que sucedió durante el proceso de la caracterización química del nitrógeno en los sustratos de ciprés y quinual, este gráfico se construyó con los resultados del análisis descriptivo obtenidos en la (Tabla 25). En donde se comprueba que entre las dos especies, el ciprés es el mejor por su menor promedio, poca variabilidad en la dispersión de datos y de menor margen de error.

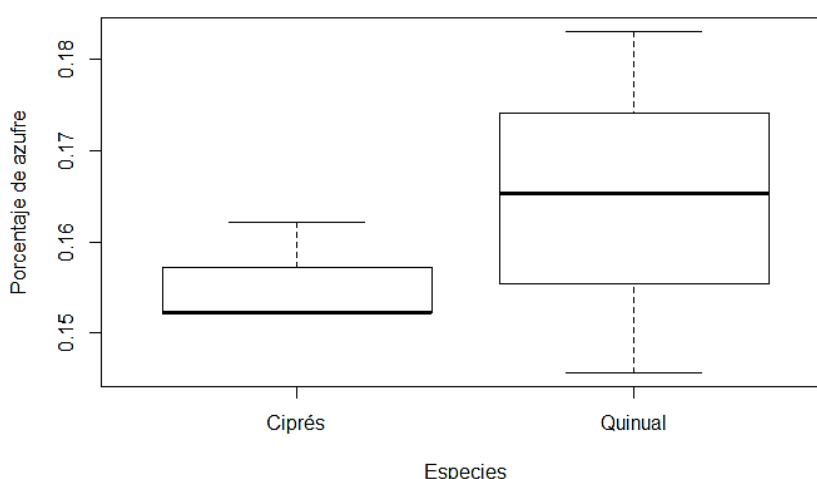


**Figura 48:** Error estándar en el porcentaje de nitrógeno durante la experimentación

#### 4.1.5 Azufre.

El porcentaje de azufre en la especie arbórea ciprés se encontró un valor promedio de 0.156 % con una desviación de 0.003, que corresponde a un intervalo de [0.153 %, 0.159 %]. El análisis elemental proporciona información de los elementos de C, H, N, O y S. El autor (Cutimbo, 2017) señala que el azufre en biomasa leñosa se han encontrado porcentajes menores al 1 % y así mismo producen baja emisión de SO<sub>x</sub> . El cual encontró un valor promedio de 0.45 % en residuos de bagazo de caña. En la especie arbórea quinal el valor promedio fue de 0.213 %, con una desviación de 0.01, que resulta en un intervalo estimado de [0.203 %, 0.223 %]. El bajo contenido de nitrógeno y de azufre es de especial importancia para la protección del medio ambiente, los autores (Romo et al., 2011) encontraron rangos de 0.1 % en residuos de aserrín y aserrín de roble y de 0.9 % en madera de café.

La concentración de S en diferentes especies es importante debido a que durante la combustión causan emisiones gaseosas. Investigaciones recientes han demostrado que el mayor impacto ambiental de la combustión de combustibles sólidos lo constituyen las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> (Nussbaumer, 2003). Por lo tanto se asume que, la especie ciprés es la mejor porque su contenido es bajo y es de menor variabilidad durante la experimentación, sugiriendo mínimo riesgo de emisiones gaseosas derivados de este compuesto al momento de torrefactor para la transformación de biochar. Lo expuesto anteriormente de detalla en la (Figura 49).



**Figura 49:** Porcentaje de azufre en las especies ciprés y quinal

## 4.2 Relación C/N en la biomasa residual

Los resultados de los indicadores descriptivos obtenidos a partir de las especies arbóreas ciprés y quinal se visualizan en la (Tabla 27).

**Tabla 27:** Contenido de Carbono/Nitrógeno en los dos tipos de biomasa residual

Especies		Variable Química	C/N
Madera 1	Ciprés	Carbono	140.35
		Nitrógeno	
Madera 2	Quinal	Carbono	78.21
		Nitrógeno	

Según los resultados obtenidos en la (Tabla 27), la relación C/N en la especie ciprés presenta 140.35, para obtener este resultado se encontró que el carbono fue alto y el nitrógeno bajo. Así mismo la relación C/N en quinal fue de 78.21. Al comparar las 2 especies se cumple que la relación C/N sea alta (mayor a 60) favoreciendo para la producción de biochar. De acuerdo con los resultados obtenidos se logró valores altos de carbono y valores bajos en nitrógeno, por lo que son factibles para la elaboración de biochar.

Lo que se corrobora con el estudio realizado por Guerra (2015) señala que el biochar es un material agotado en nitrógeno y con alto contenido de carbono que induce a una relación de C/N alto, en donde encontró un valor de 119.84 de C/N en la cáscara de sachá inti, 150.48 de C/N en palmito, 43.31 en biochar de cáscara de cacao y en hoja de palma una relación de 59.47. Otro estudio realizado por Shermbagavalli y Mahimairaja (2012), detallan que el rango de la relación C/N varía de 51.4 a 9.8 en biomasa de paja de arroz y de cáscara de coco. Al comparar con la relación obtenida en este estudio, existe diferencia significativa debido a las características físico-químicas de la biomasa empleada.

## 4.3 Análisis termogravimétrico en la biomasa

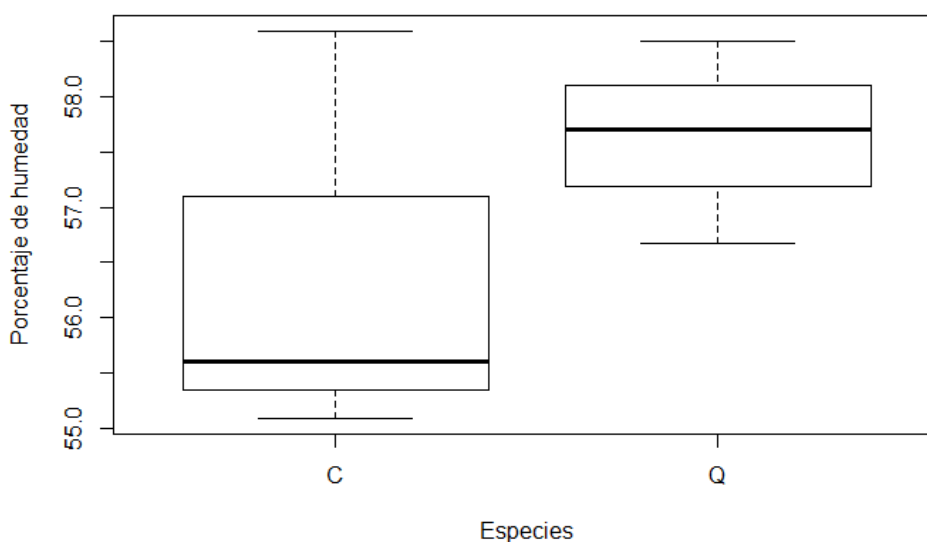
### 4.3.1 Humedad.

El contenido de humedad de la biomasa se analizó con el propósito de identificar la cantidad de agua como porcentaje de peso. Los materiales de biomasa exhiben una amplia gama del contenido de humedad, extendiéndose de al menos 10 % para cereales y de 50 % -70 % para los residuos de bosque. El contenido de humedad para las especies arbóreas de ciprés y quinal encontrados se aprecia en la (Tabla 28):

**Tabla 28:** Porcentaje de humedad en la biomasa

Especies	Repeticiones		
	I	II	III
Ciprés	58.60	55.09	55.60
Quinual	45.92	45.27	45.07

La (Figura 50) se observa el contenido de humedad en porcentaje, se realizó con los datos de la (Tabla 28), en donde se visualiza que en la especie ciprés es de menor variabilidad y bajo contenido, mientras que en la especie quinual es de mayor dispersión y de alto contenido, al comparar las dos especies la variación del contenido es notable.



**Figura 50:** Porcentaje de humedad en las especies ciprés (C) y quinual (Q)

La (Tabla 29) hace referencia a los indicadores descriptivos del contenido de humedad presente en los dos tipos de biomasa.

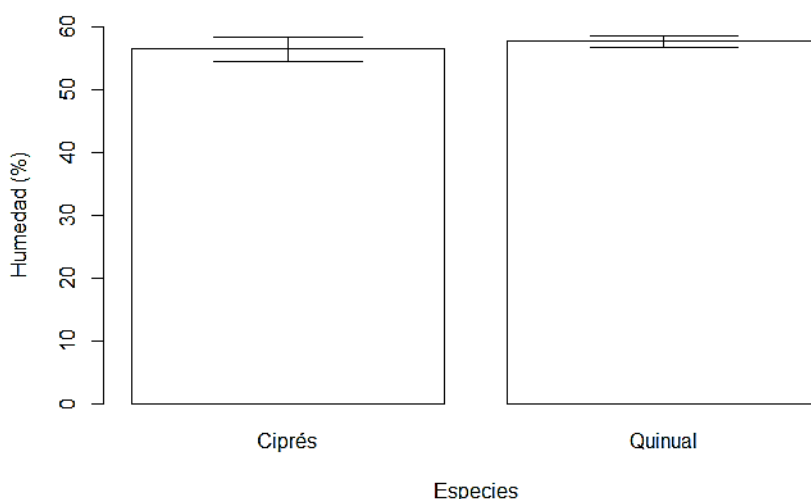
**Tabla 29:** Porcentaje de humedad en los sustratos

Sustratos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Ciprés	56.43	55.60	1.90	3.36	1.09
Quinual	57.62	57.70	0.92	1.59	0.53

El contenido de humedad en la especie arbórea ciprés se encontró un valor promedio de 56.43 % con un error estándar de 1.09, que resulta en un intervalo estimado de [55.34 %, 57.52 %]. Para la especie arbórea quinual se consiguió un valor promedio de 57.62

% con un error estándar de 0.53, que pertenece a un intervalo de [57.09 %, 58.15 %]. En donde se comprueba que para las 2 especies, presentan un porcentaje de humedad alto por lo que se sometió a otro proceso de medición en una estufa, previo para la producción de biochar.

En la (Figura 51) se visualiza un gráfico que representa el error estándar que sucedió en el proceso de la experimentación durante la caracterización de la humedad en los sustratos de ciprés y quinal, este gráfico se construyó con los resultados del análisis descriptivo obtenidos en la (Tabla 28). Para lo cual se comprobó que, entre las dos especies presentan mayor margen de error durante la experimentación.



**Figura 51:** Error estándar de la humedad en las especies ciprés y quinal

De acuerdo con los resultados de humedad, las dos tipos de biomasa presentaron altos porcentajes por lo que se sometió a otro proceso de secado obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la (Tabla 30), este ensayo se realizó con 9 repeticiones para mayor precisión.

**Tabla 30:** Corrección del porcentaje de humedad en la biomasa

Especies	Variable	Repeticiones								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Ciprés	humedad	8.53	8.50	8.55	8.49	8.53	8.66	8.52	8.62	8.72
Quinal		8.16	8.22	8.15	8.10	8.19	8.15	8.16	8.0	8.27

De acuerdo con los resultados determinados en la (Tabla 30), para la especie ciprés presenta un valor promedio de 8.43 %, mientras que para quinal el valor promedio del

contenido de humedad es de 8.33 %, estos resultados son ideales para la producción de biochar, en un estudio realizado por Bermeo (2018) al caracterizar residuos de balsa se encontró 9.25 % del contenido de humedad, valor similar a los resultados encontrados. Por otro lado al comparar con los resultados de la (Tabla 28), es notable la variación. Así mismo (Garzón, 2018) descubrió el 6.04 % de humedad en biomasa de eucalipto. Se evidencia que la humedad en ciprés y quinal disminuyó más del 65 % aproximadamente.

#### 4.3.2 Material volátil.

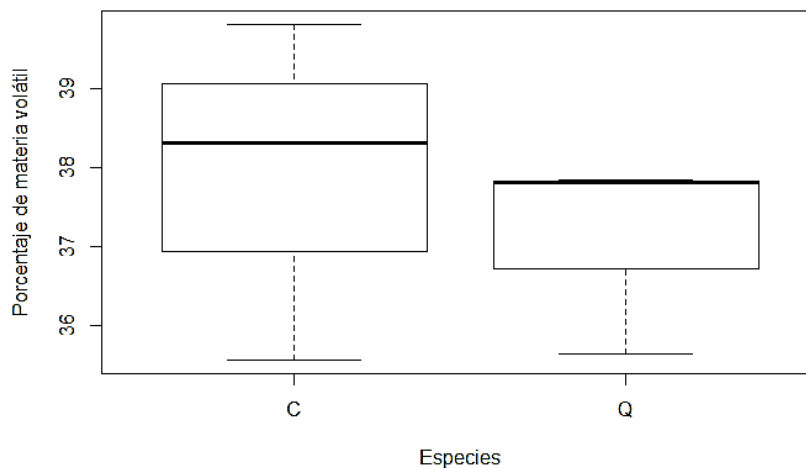
Se refiere a la parte de la biomasa que se obtiene cuando empieza la torrefacción (combustión) desde 200 °C a 500 °C de temperatura, durante este proceso de calentamiento la biomasa se descompone en gases volátiles y carbón de leña sólido. De acuerdo con el estudio realizados por García et al., (2016) manifiesta que la biomasa presenta hasta un 80 % de materia volátil, mientras que en carbón es de 60 % a temperaturas bajas.

Los resultados encontrados mediante el análisis termogravimétrico para las 2 especies arbóreas de estudio se aprecian en la (Tabla 31), para este análisis se realizó 3 repeticiones por especie.

**Tabla 31:** Contenido de materia volátil en la biomasa residual expresado en porcentaje

Especies	variable	Repeticiones		
		I	II	III
Ciprés	Material Volátil	35.56	39.81	38.31
Quinal	Material Volátil	35.63	37.8	37.84

La (Figura 52) representa el contenido de materia volátil que poseen los sustratos de estudio ciprés (C) y quinal (Q). Se encontró que en la biomasa de ciprés y quinal son de bajo contenido y variabilidad en la dispersión de datos, lo que significa que son viables para la producción de biochar a temperaturas bajas (200 °C).



**Figura 52:** Contenido de materia volátil en las especies ciprés (C) y quinual (Q)

A continuación en la (Tabla 32), se muestran los resultados de los indicadores descriptivos realizados para el contenido de materia volátil en los sustratos de estudio.

**Tabla 32:** Porcentaje de material volátil en la biomasa

Sustratos	Media	Mediana	DE	CV	EE
Ciprés	37.89	38.31	2.16	5.69	1.24
Quinual	37.09	37.80	1.26	3.41	0.73

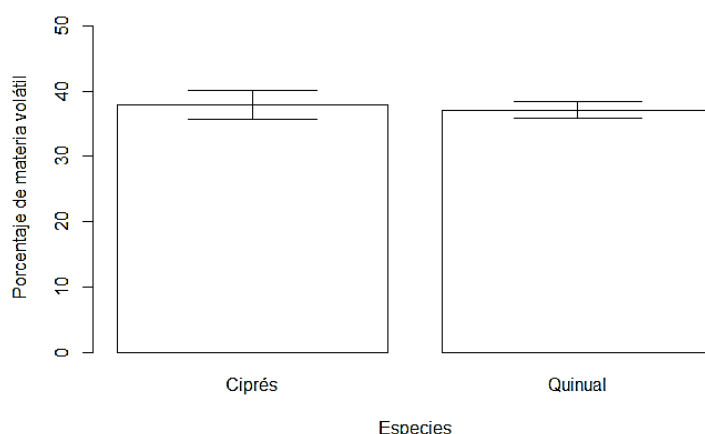
En la biomasa residual de ciprés se encontró un valor promedio de 37.89 % con un error estándar de 1.24, que resulta en un intervalo estimado de [36.65 %, 39.13 %]. Bermeo (2018) encontró el 84.51 % de material volátil en residuos de balsa, valor alto en comparación con las biomásas de estudio, debido a sus propiedades químicas son diferentes.

Sin embargo en la especie quinual presenta un valor promedio de 37.80 %, el error estándar fue de 0.73, que corresponde a un intervalo de [37.07 %, 38.53 %]. Lo que se asume que al tener un contenido de materia volátil bajo, menor son los gases contaminantes hacia la atmósfera. Así mismo García et al., (2016) al caracterizar biomasa de eucalipto encontró 55.60 % de materia volátil, con relación a las especies de estudio este valor es semejante, debido a la estructura química que posee y el método de caracterización fue similar.

Al comparar las 2 especies poseen menor promedio y variabilidad de datos durante la experimentación. El contenido de materia volátil del bagazo de caña de azúcar encontrado en el trabajo realizado por (Cutimbo, 2017) fue del 80 % y este alto contenido

puede ser beneficioso en el proceso de co-combustión contribuyendo a incrementar la reactividad.

La (Figura 53) representa el error estándar que sucedió durante el proceso de caracterización de materia volátil (CO y CO<sub>2</sub>). Se demostró que las 2 especies son mejores para la producción de biochar debido a su contenido bajo y menor margen de error en cuanto a la dispersión de datos durante la experimentación.



**Figura 53:** Error Estándar del contenido de materia volátil en los sustratos

#### 4.4 Elaboración de biochar por el método de torrefacción

La temperatura del proceso de torrefacción es de gran importancia, ya que a medida que transcurre el proceso, la biomasa cambia de color y las características, semejándose a las de un carbón, el consumo de calor y pérdida de masa se dan conforme aumenta la temperatura. Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos a escala de laboratorio, se establecieron tres temperaturas para la obtención de biochar.

La (Tabla 33) representa la masa inicial y final utilizado para la producción de biochar obtenido a tres temperaturas a partir de la biomasa residual, el tratamiento corresponde a las temperaturas de análisis: T1 (200 °C), T2 (250 °C) y T3 (300 °C) para la madera 1 (ciprés), mientras que para la madera 2 (quinual) los tratamientos son T4 (200 °C), T5 (250 °C) y T6 (300 °C), además se puede visualizar valores de la masa inicial con las que ingresa la biomasa para ser transformada.

**Tabla 33:** Peso de la biomasa para la producción del biochar expresado en g

Especies		Tratamientos	Masa Inicial	Masa final
Madera 1	Ciprés	T1	841.35	553
		T2	880.04	493
		T3	834.68	367
-----				
Madera 2	Quinual	T4	837.57	559
		T5	852.28	483
		T6	831.07	381

En la (Tabla 34), manifiesta los porcentajes del rendimiento del biochar producido a las tres temperaturas.

**Tabla 34:** Rendimiento del biochar producido a 3 temperaturas expresado en porcentaje

Especies		Tratamientos	Método	Rendimiento del biochar
Madera 1	Ciprés	T1	Torrefacción	65.77
		T2		56.02
		T3		43.93
-----				
Madera 2	Quinual	T4	Torrefacción	66.69
		T5		56.70
		T6		45.85

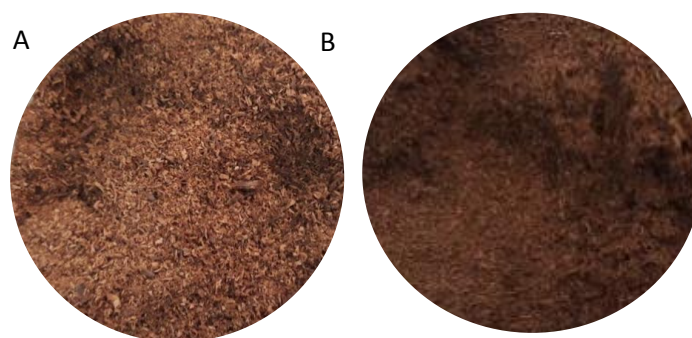
La (Tabla 34) señala que 200 °C de temperatura (T1 y T4), para las 2 especies ciprés y quinual, el rendimiento corresponde entre 65.77 % y 66.69 % respectivamente, el biochar resultante presentó notable cantidad de biomasa aún sin pirolizar. El biochar de ciprés presentó características de biomasa tostada y no tuvo ninguna cantidad de ceniza. Por otro lado el biochar de quinual a esta temperatura también presentó notable cantidad de biomasa que no se ha combustionado por completo.

Fue evidente que a menores temperaturas hay mayor rendimiento másico, debido a que la biomasa no pierde en su totalidad sus características químicas como la celulosa al ser aserrín de maderas duras. Por lo tanto al comparar con los resultados obtenidos con el estudio realizado por Bermeo (2018), encontró 58.18 % del rendimiento másico en aserrín de balsa torrefactado a 220 °C, siendo este valor bajo y similar, esto se debe a que la composición física y química del aserrín se obtuvo mayor cantidad de materia volátil por lo cual, al aumentar la temperatura se eliminó gran cantidad de estos componentes lo que disminuyó a la vez su masa por lo tanto su rendimiento.. Así mismo Bergan y Kiel (2005) encontraron el 87.5 % del rendimiento másico para sólidos luego del proceso de torrefacción.

De igual manera Herrera (2018) pirolizó olote de maíz a 177 °C y generó un rendimiento másico del 31 %, mientras que a 977 °C de temperatura, obtuvo un

rendimiento del 6 %, por lo que se demuestra que a mayor temperatura disminuye el rendimiento. El tiempo de residencia, aunque en menor medida, también afecta a la descomposición térmica e la biomasa, a mayor tiempo e torrefacción, menor es el rendimiento másico, debido a la pérdida de la mayoría de los componentes de las biomasa residual.

A continuación en la (Figura 54) se visualiza el biochar de ciprés y quinal obtenido mediante el método de torrefacción a 200 °C de temperatura.



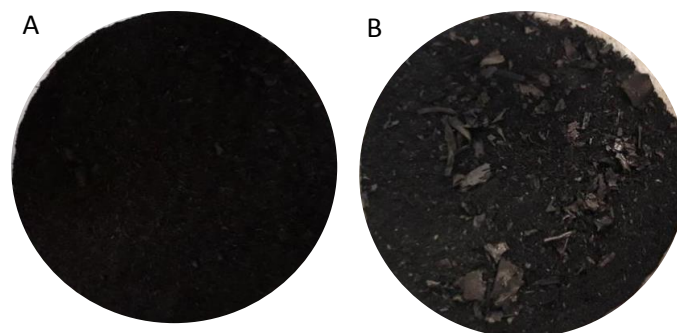
**Figura 54:** Resultado del biochar obtenido a 200 °C, (A: ciprés; B: quinal)

Por otro lado en la (Figura 55) se visualiza el biochar obtenido a 250 °C de temperatura (T2 y T5), el rendimiento en biochar de ciprés presentó un valor de 56.02 % y para quinal el 56.70 %. Se obtuvo una mejor condición del biochar ya que se observó un mejor rendimiento másico, debido a que presentó un color negro similar a la de un carbón. La torrefacción se realizó por completo sin presencia de cenizas. Sin embargo Iglesias (2018) señala que obtuvo muestras de biochar de eucalipto con notable cantidad de biomasa sin pirolizar, al comparar con las especies de estudio demuestra diferencia significativa, debido a que el método de producción, condiciones climatológicas y las características del eucalipto, no son similares. Se han publicado diferentes trabajos con biochar de maderas duras. Sin embargo, para las maderas de esta investigación se han realizado pocos trabajos, por lo que se comparó con el biochar de álamo ya que presenta características casi similares, al pirolizar a esta misma temperatura se encontró el 31 % del rendimiento, valor con ligera variación debido a su método de producción ( Martínez y Bohórquez, 2017).

En cambio al compararlo con el biochar de trigo cuyo rendimiento másico varía de 47.56 % a 31.61 % a las mismas condiciones de temperatura (250 °C a 300 °C) luego de la torrefacción, se puede apreciar que el rendimiento es mayor, lo que significa que

en el trigo existe menor materia volátil que en las biomásas de estudio (Bustamante García et al., 2017)

A continuación en la (Figura 55) representa el biochar de ciprés y quinal obtenido a 250 °C de temperatura.

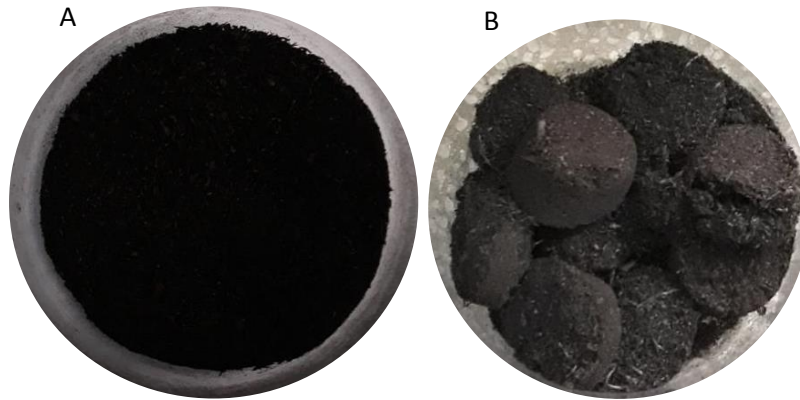


**Figura 55:** Resultados de biochar a 250 °C de temperatura (A: ciprés; B: Quinal)

Mientras que a 300 °C de temperatura (T3 y T6), el rendimiento másico del biochar obtenido a partir del ciprés fue de 43.93 % y para quinal de 45.85 %, al comparar los 2 tipos de biochar presentaron bajo rendimiento másico. La biomasa perdió sus propiedades químicas. Bermeo (2018) encontró 42.20 % del rendimiento másico a partir de los residuos de balsa. Al comparar con los resultados de esta investigación, presenta ligera variación. De igual manera, Martínez (2015) realizó biochar con residuos de álamo a 300 °C y 500 °C de temperatura, donde obtuvo un rendimiento del 8 % y 29 %, al comparar con los resultados de esta investigación el rendimiento con pirólisis rápida fue bajo.

Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la torrefacción son muy complejas y dependen tanto de la naturaleza de la biomasa como de las condiciones en las que se produce biochar. Cuando se usa tecnología de alta eficiencia es posible alcanzar rendimientos de masa alrededor del 30 % - 40 % (base húmeda), con producciones de energía de cerca del 30 % (contenida en el carbón) y contenidos de carbono fijado arriba del 90 % de la biomasa original (McHenry, 2009).

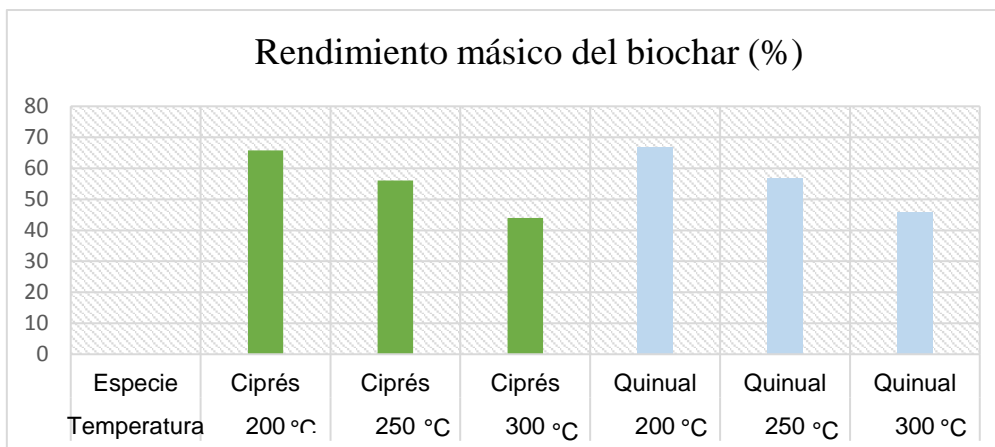
En la (Figura 56), se muestra el biochar de ciprés y quinal obtenido a 300 °C de temperatura, se demuestra que la biomasa torrefactó por completo, cambió su color completamente a negro, la presencia de ceniza fue mínima entre el 1 % para el biochar de ciprés, mientras que en biochar de quinal no hubo presencia de cenizas.



**Figura 56:** Resultado de biochar a 300 °C (A: ciprés; B: quinual)

Al comparar los 6 tratamientos aproximadamente a 200 °C el porcentaje de rendimiento es alto debido a que al pirolizar la biomasa no se rompen los enlaces de hidrógeno y de carbono en su totalidad, mientras que a 250 °C, la biomasa se calienta, se da la deformidad y se van rompiendo los enlaces de celulosa dando como resultado la emisión de extractos lipofílicos, por lo tanto, la biomasa no puede recuperar su estructura original. Al pasar los 280 °C y 300 °C, se degradan completamente los componentes lignocelulósicos y se forman extractos hidrófilos, éteres y gases como CO y CO<sub>2</sub>, la biomasa tiende a cambiar su color a más oscuro, además la biomasa sufre procesos de carbonización de los polímeros y la desvolatilización, en donde la biomasa cambia totalmente el color a negro.

La (Figura 57) representa el porcentaje del rendimiento másico, se observa los 6 tipos de biochar producidos a 3 temperaturas, el cual manifiesta que, a mayor temperatura de torrefacción, menor es el rendimiento másico, debido a la pérdida de la mayoría de los componentes químicos de la biomasa residual.



**Figura 57:** Rendimiento másico de los seis tipos de biochar

#### 4.5 Análisis químico del biochar

Este análisis tuvo como propósito caracterizar el biochar producido a 3 temperaturas (200 °C, 250 °C y 300 °C), mediante el análisis elemental en los dos tipos de biomasa residual (ciprés y quinual), después de la torrefacción, para caracterizar el contenido de carbono total, hidrógeno total, oxígeno total, nitrógeno y azufre, este análisis se realizó 3 repeticiones por variable química y temperatura, los resultados encontrados vienen descritos en la (Tabla 35).

**Tabla 35:** Resultado de la caracterización química del biochar expresado en porcentaje

Biochar	Temperatura	Variable Química	Repeticiones		
			I	II	III
Ciprés	200 °C	Carbono	48.04	48.12	47.77
		Hidrógeno	6.00	6.08	6.07
		Oxígeno	27.01	24.84	28.89
		Nitrógeno	0.22	0.27	0.26
		Azufre	0.99	0.98	0.99
	250 °C	Carbono	59.23	58.97	58.49
		Hidrógeno	3.64	3.62	3.74
		Oxígeno	0.0021	0.0022	0.0021
		Nitrógeno	0.54	0.54	0.51
		Azufre	0.02	0.02	0.02
	300 °C	Carbono	76.14	76.64	75.32
		Hidrógeno	3.40	3.46	3.45
		Oxígeno	0.0028	0.0035	0.0030
		Nitrógeno	0.51	0.50	0.48
		Azufre	0.02	0.01	0.02
Quinual	200 °C	Carbono	49.16	49.11	49.31
		Hidrógeno	5.77	5.78	5.76
		Oxígeno	33.59	33.12	32.52
		Nitrógeno	0.60	0.64	0.60
	250 °C	Azufre	0.18	0.19	0.18
		Carbono	59.06	59.17	58.98
		Hidrógeno	3.38	3.41	3.32
		Oxígeno	0.00218	0.00213	0.00224
		Nitrógeno	1.08	1.13	1.11

Biochar	Temperatura	Variable Química	Repeticiones		
			I	II	III
		Azufre	0.11	0.13	0.10
		Carbono	58.17	58.36	58.47
		Hidrógeno	3.53	3.45	3.49
	300 °C	Oxígeno	0.0066	0.0071	0.0071
		Nitrógeno	1.10	1.12	1.10
		Azufre	0.11	0.10	0.11

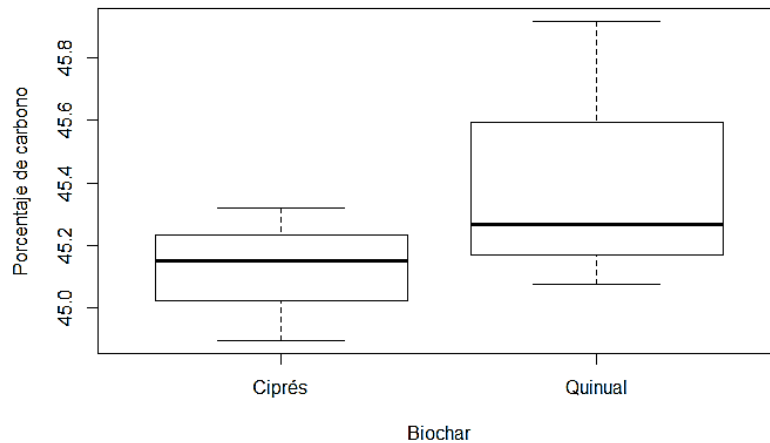
#### 4.5.1 Carbono total.

En la (Tabla 36) se describen los indicadores descriptivos de tendencia central (Media y Mediana), dispersión (desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) y error estándar (EE) obtenido con los datos del contenido de carbono descritos en la (Tabla 35), donde los tratamientos hacen referencia a las temperaturas de torrefacción en las que se realizó el biochar, 200 °C (T1 y T4), 250 °C (T3 y T5), 300 °C (T3 y T6).

**Tabla 36:** Contenido de carbono del biochar expresado en porcentaje

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo					
		Media	Mediana	DE	CV	EE	
Madera 1	Ciprés	T1	47.98	48.04	0.18	0.38	0.11
		T2	45.42	45.27	0.44	0.98	0.26
		T3	76.03	76.14	0.67	0.88	0.39
Madera 2	Quinual	T4	49.19	49.16	0.11	0.22	0.06
		T5	59.07	59.06	0.09	0.16	0.05
		T6	58.33	58.36	0.15	0.26	0.09

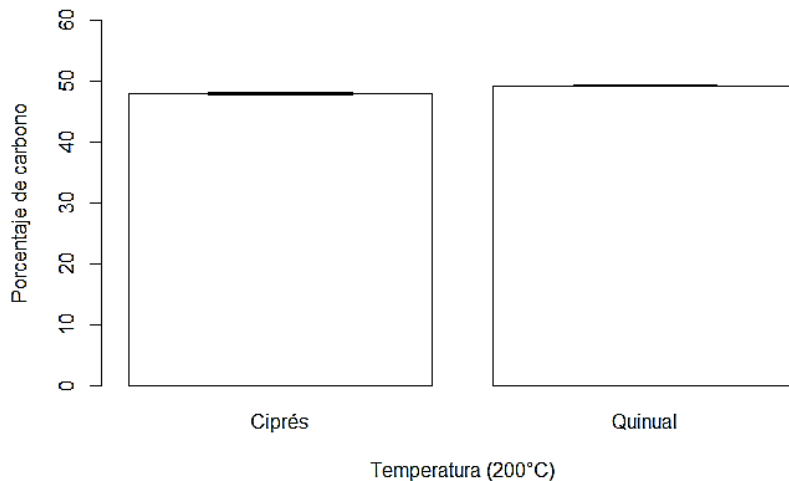
La (Figura 58) expresa los resultados del porcentaje de carbono en los 2 tipos de biochar obtenidos a 3 temperaturas de torrefacción, descritos en la (Tabla 35), donde se comprueba que, el contenido de carbono en la biomasa de ciprés es de alto contenido y variabilidad. Mientras que, para quinual su variabilidad es estable, lo que significa que esta especie es la mejor para torrefactar porque los gases presentes son mínimos originando menor impacto de contaminación hacia la atmósfera.



**Figura 58:** Porcentaje de carbono en biochar de ciprés y quinual

De acuerdo con los resultados obtenidos, el contenido de carbono a 200 °C de temperatura (T1 y T4), en el biochar de ciprés los valores de tendencia central fueron de 47.98 % con un error estándar de 0.11 que corresponde a un intervalo de [47.87 %, 48.09 %]. Así mismo para quinual su valor promedio se encontró el 49.19 %, con un error estándar de 0.06 que resulta en un intervalo de [49.13 %, 49.25 %]. Obteniendo así que el biochar de quinual es de alto contenido y menor variabilidad de resultados en la experimentación, al ser una madera blanda es posible torrefactar a bajas temperaturas. Según el estudio realizado por García et al., (2016) encontró porcentajes de carbono en biochar de pino en base seca al torrefactar a 200 °C de temperatura logró un valor promedio de 53.67 %, este valor es casi similar a los resultados obtenidos, debido a que el pino tienen características químicas iguales con las dos especies arbóreas de estudio.

A continuación en la (Figura 59) constituye el error estándar que ocurrió durante la experimentación de la caracterización química del carbono en el biochar producido a 200 °C a partir de los dos sustratos de estudio. Donde se encontró que el biochar de quinual es el que posee alto contenido por su mínima variabilidad en la dispersión de datos y de menor margen de error durante la experimentación.

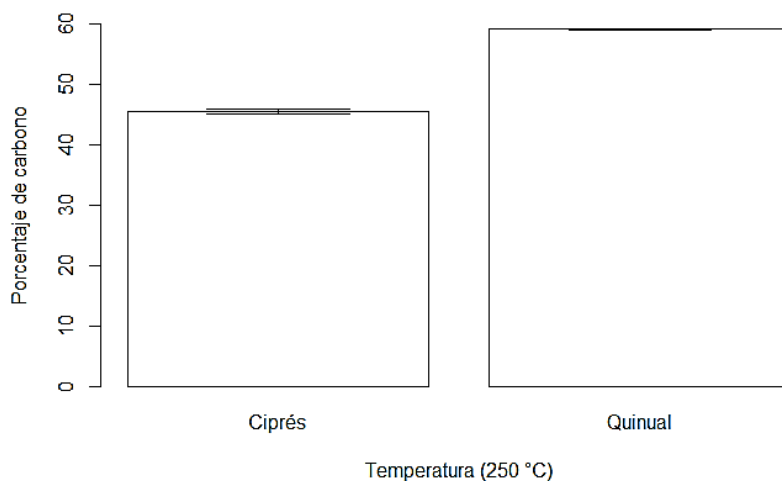


**Figura 59:** Error Estándar del porcentaje de carbono en el biochar a 200 °C

Sin embargo a 250 °C (T2 y T5) de temperatura, para el biochar obtenido de ciprés, el porcentaje de carbono presentó un valor promedio de 45.42 %, con un error estándar de 0.26, en intervalos de [45.16 %, 45.68 %] y para quinual se encontró 59.07 %, con un error estándar de 0.05, en intervalos estimados de [59.02 %, 59.12 %]. Lo que significa que el biochar a partir de quinual es el mejor por su mínima variabilidad en la dispersión de porcentajes encontrados, además posee menor margen de error. Al someter esta biomasa a temperaturas altas de reacción hay aumento significativo de carbono. Por otro lado el biochar de ciprés, resultó tener un porcentaje de carbono bajo.

De acuerdo con un estudio realizado por Bermeo (2018) encontró 39.49 % de carbono en biochar de residuos de balsa, de igual manera Guerra (2015) encontró valores de carbono de 34.92 % y 89.47 % con respecto a los ocho tipos de biochar estudiados, al relacionar con los porcentajes encontrados en esta investigación presenta un valor similar.

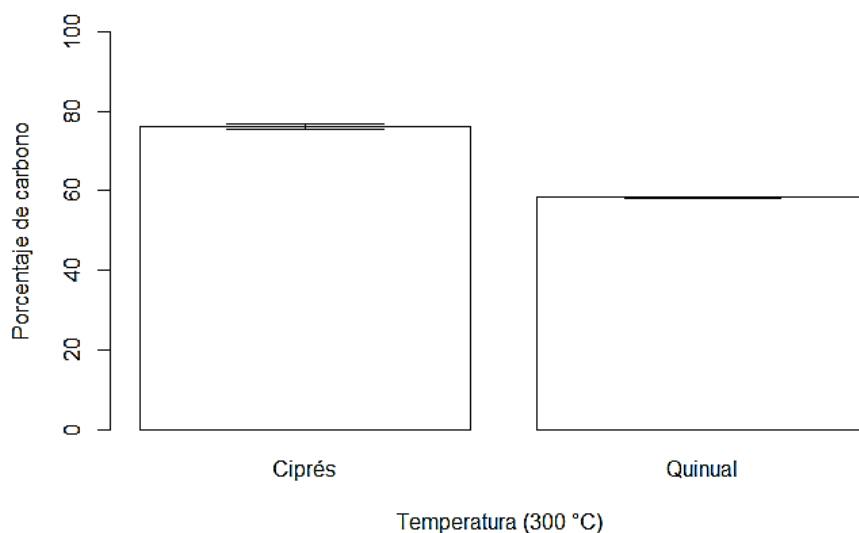
La (Figura 60) representa el error estándar que sucedió durante la experimentación en la caracterización de carbono en el biochar producido a 250 °C a partir de 6 dos tipos de biochar encontrados, lo que se comprueba que, el biochar de quinual es el mejor por su mínima variabilidad del porcentaje de carbono y es de menor margen de error durante la experimentación.



**Figura 60:** Error Estándar del contenido de carbono en el biochar a 250 °C

Por otro lado a temperaturas de 300 °C (T3 y T6), se consiguió un valor de 76.03 % de carbono en biochar de ciprés, con un error estándar de 0.39, que corresponde a un intervalo de [75.64 %, 76.42 %]. En biochar de quinual se halló el 58.36 %, con una desviación de 0.09, que resulta en un intervalo estimado de [58.27 %, 58.45 %]. Entre las 2 especies, el biochar de quinual posee mínima variabilidad en la dispersión de datos encontrados al realizar el experimento y es de bajo contenido. En un estudio realizado por Castro (2018) en el biochar obtenido a partir de pinus patula encontró porcentajes de carbono de 42.50 % y 66.45 % a temperaturas de 470 °C, este valor es similar a los resultados obtenidos.

El siguiente gráfico (Figura 61) expresa el error estándar que ocurrió durante la experimentación durante la caracterización química del carbono en el biochar producido a 300 °C de temperatura a partir de los dos sustratos de estudio, donde se comprueba que, el biochar a partir de quinual es el mejor que posee menor margen de error durante la experimentación.



**Figura 61:** Error Estándar del contenido de carbono en el biochar a 300 °C

Al comparar los seis tratamientos se comprueban que, mientras mayor es la temperatura, mayor es el contenido de carbono con respecto a la biomasa residual. Como es el caso del biochar obtenido a partir de ciprés a 300 °C posee un alto contenido de carbono, mientras que en el biochar obtenido a partir de quinual posee mayor contenido de carbono en las temperaturas de 250 °C y 300 °C. Obteniendo así que el biochar a partir de ciprés a 300 °C y quinual a 250°C son los mejores en cuanto a su contenido.

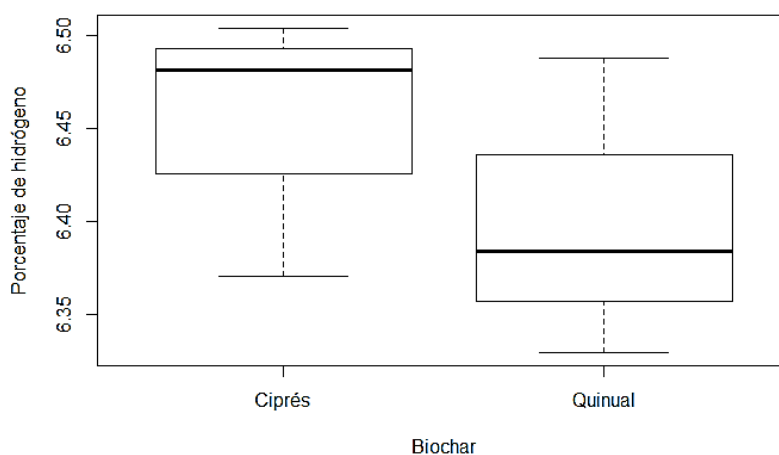
#### 4.5.2 Hidrógeno total.

En la (Tabla 37), se muestran los indicadores descriptivos obtenidos con los datos del contenido de hidrógeno encontrados en la (Tabla 35), en donde los tratamientos hacen referencia a las temperaturas de torrefacción en las que se realizó el biochar.

**Tabla 37:** Contenido de hidrógeno total en el biochar expresado en porcentajes

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo				
		media	mediana	DE	CV	EE
Madera 1 Ciprés	T1	6.05	6.07	0.04	0.77	0.03
	T2	3.67	3.64	0.06	1.68	0.04
	T3	3.44	3.45	0.03	0.97	0.02
Madera 2 Quinual	T4	5.77	5.77	0.10	0.17	0.01
	T5	3.37	3.38	0.05	1.39	0.03
	T6	3.49	3.49	0.04	1.13	0.02

A continuación la (Figura 62), manifiesta los resultados de hidrógeno descritos en la (Tabla 37) para el biochar de ciprés y quinal obtenido a 3 temperaturas. En donde se muestra que, el biochar obtenido de quinal es de menor promedio y variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación, mientras que el biochar de ciprés posee mayor variabilidad.

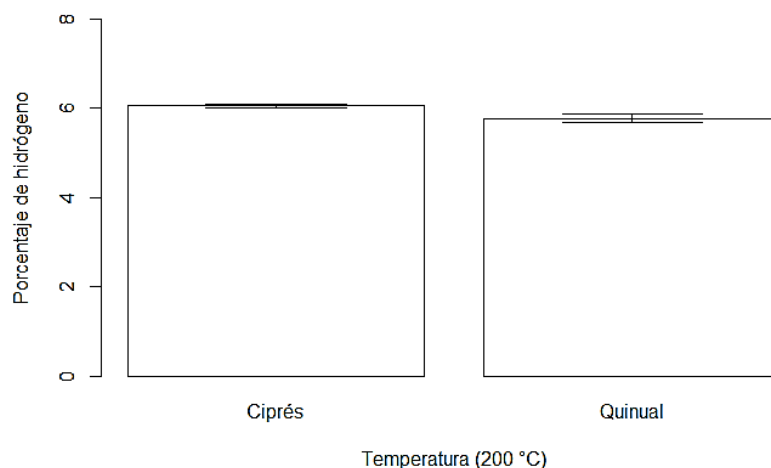


**Figura 62:** Porcentaje de hidrogeno en biochar a partir de ciprés y quinal

El biochar obtenido a 200 °C de temperatura (T1 y T4), el contenido de hidrógeno a partir del ciprés se encontró un valor promedio de 6.05 % de hidrógeno total, con un error estándar de 0.03 que corresponde a un intervalo de [6.02 %, 6.08 %]. En el biochar de quinal fue de 5.77 %, con un error estándar de 0.01, que resulta en un intervalo estimado de [5.76 %, 5.78 %]. Entre los dos tratamientos el biochar de quinal presenta menor promedio, su contenido es bajo y es de menor variabilidad en la dispersión de datos.

Es factible que el biochar presente menor cantidad de hidrógeno. La composición química de los biocarbones es muy variable, según Cheng et al., (2018) encontró 1.70 % del contenido de hidrógeno en biocarbón producido a partir de roble blanco y rojo, al comparar este valor con las especies de estudio es variable debido a su estructura química.

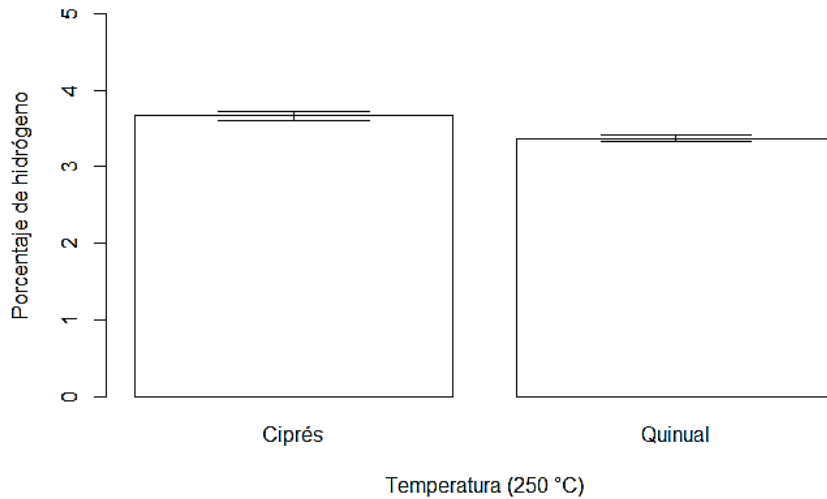
El error estándar que sucedió durante la experimentación de la caracterización química del hidrógeno en los 2 tipos de biochar se visualiza en la (Figura 63), donde se comprueba que, el biochar de quinal es el mejor por su menor margen de error y su contenido es bajo.



**Figura 63:** Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 200 °C

Sin embargo a temperaturas de 250°C (T2 y T4), los valores de contenido promedio de hidrógeno para el biochar obtenido de ciprés es de 3.67 % con un error estándar de 0.04, en intervalos de [3.63 %, 3.71 %] y el promedio en el biochar de quinual es de 3.37 %, con un error estándar de 0.03, en intervalos de [3.34 %, 3.40 %], al comparar los dos tipos de biochar, se obtiene que el biochar de quinual presenta menor variabilidad y su contenido es bajo, siendo favorable para su uso ya sea como fertilizante o como aditivo para el suelo. Por otro lado el biochar a partir de ciprés tiene mayor variabilidad en la dispersión de datos. Donde se comprueba que el biochar de quinual es el mejor porque posee bajo contenido. Según un estudio realizado por Martínez y Bohórquez (2017), donde encontró un valor de 4.50 % de hidrógeno en biochar de bagazo de caña expuesto a temperaturas entre 250 °C.

La (Figura 64) es un gráfico que representa el error estándar que sucedió durante la experimentación de la caracterización química del hidrógeno en el biochar producido a 250 °C a partir de los dos sustratos de estudio, donde se comprueba que, el biochar a partir de quinual es el mejor por su mínima variabilidad y de menor margen de error.

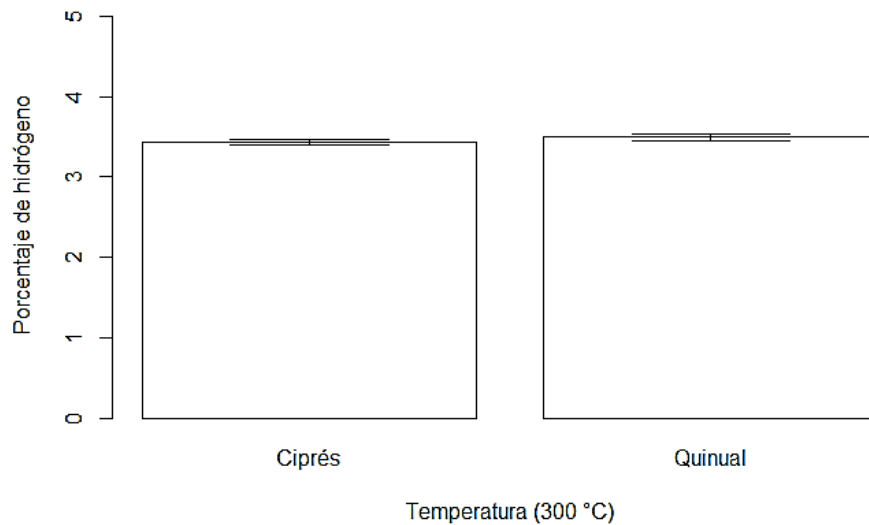


**Figura 64:** Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 250 °C

Por otro lado a 300 °C (T3 y T6) de temperatura, en el biochar de ciprés se encontró un promedio de 3.44 % de hidrógeno, con un error estándar de 0.02, que corresponde a un intervalo estimado de [3.42 %, 3.46 %]. Mientras que en biochar de quinual presentó 3.49 %, con error estándar de 0.02, que resulta a un intervalo estimado de [3.47 %, 3.51 %]. Al comparar los 2 tipos de biochar; el de ciprés es el mejor porque tiene menor variabilidad en la dispersión de datos y contenido. De igual manera Castro (2018) al caracterizar biochar obtenido a partir de *Pinus patula* a 470°C de temperatura encontró porcentajes de 0.51 % y 5.51 % del contenido de hidrógeno.

Al comparar los seis tipos de biochar se comprueba que mientras mayor es la temperatura, menor es el contenido de hidrógeno, debido a que el hidrógeno está presente en la celulosa, lignina y como agua, conforme se calienta la biomasa y se van rompiendo los enlaces (Urien, 2013).

El siguiente gráfico (Figura 65) representa el error estándar que ocurrió durante la experimentación en la caracterización química del hidrógeno a partir del biochar obtenido a 300 °C de temperatura para las dos especies ciprés y quinual. Donde se comprueba que el biochar de ciprés es el mejor por su menor margen de error y su contenido es bajo.



**Figura 65:** Error estándar del contenido de hidrógeno en el biochar a 300 °C

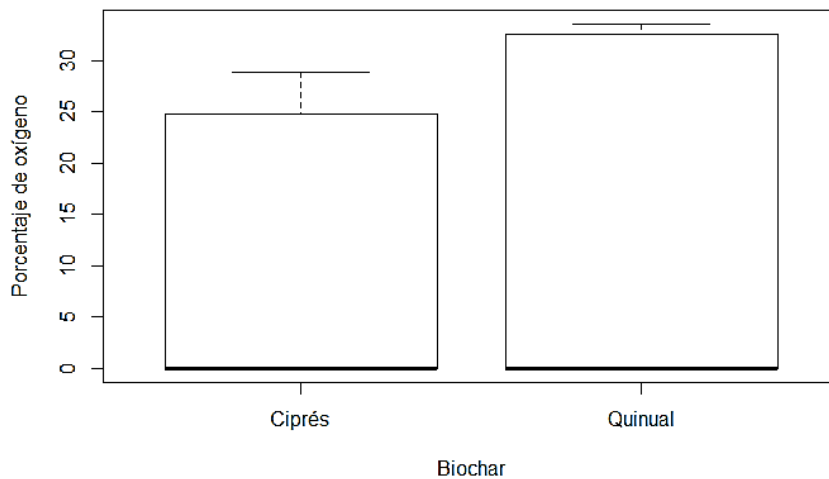
#### 4.5.3 Oxígeno total.

Los resultados del análisis descriptivo realizado con los datos del contenido de oxígeno encontrados en la (Tabla 35) se describen en la (Tabla 38), donde los tratamientos hacen referencia a las temperaturas de torrefacción en las que se realizó el biochar a 200 °C (T1 y T4), 250°C (T3 y T5) y 300°C (T3 y T6).

**Tabla 38:** Porcentaje de oxígeno en el biochar de ciprés y quinual

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo				
		media	mediana	DE	CV	EE
Madera 1 Ciprés	T1	26.91	27.01	2.02	7.51	1.17
	T2	0.0021	0.0021	0.000060	2.17	0.000033
	T3	0.003	0.003	0.00036	11.63	0.00021
Madera 2 Quinual	T4	33.08	33.12	0.53	1.62	0.31
	T5	0.0022	0.0021	0.0002	7.87	0.0001
	T6	0.0069	0.0071	0.0003	4.20	0.0002

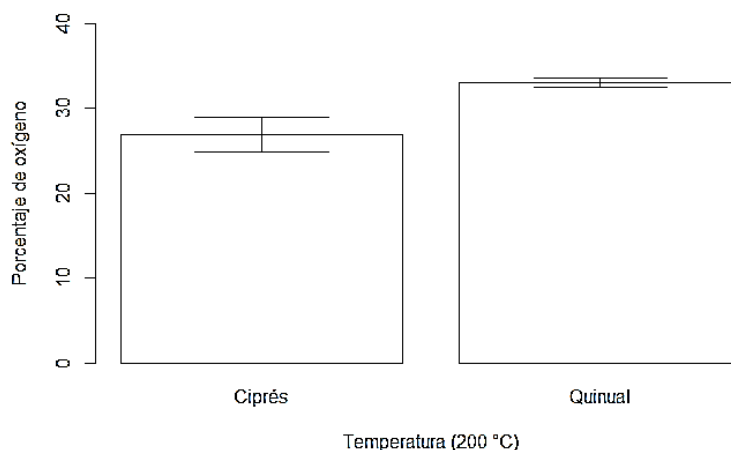
La (Figura 66) es un gráfico elaborado con los resultados del oxígeno en el biochar descritos en la (Tabla 38) obtenido a 3 temperaturas a partir de ciprés y quinual. Donde se muestra que en los 2 tipos de biochar son de alto contenido y se comprobó que mientras la temperatura de torrefacción es baja, la biomasa no pierde la cantidad de oxígeno, conforme incrementa se convierte en un producto sólido rico en carbón poroso.



**Figura 66:** Porcentaje de oxígeno en el biochar de ciprés y quinal

De acuerdo con los resultados obtenidos en la (Tabla 38), al caracterizar biochar obtenido a 200 °C de temperatura, se encontró un valor promedio de 26.91 % del contenido de oxígeno en el biochar obtenido a partir del ciprés, con un error estándar de 1.17, que resulta en un intervalo de [25.74 %, 28.08 %]. En el biochar de quinal se obtuvo un promedio de 33.08 %, con una desviación de 0.31, que corresponde a un intervalo de [32.77 %, 33.39 %]. Al comparar los 2 tipos de biochar el contenido es alto, debido a que la biomasa aún no pierde la humedad en su totalidad, conforme incrementa la temperatura la biomasa pierde su estructura. Por lo que no es viable torrefactor la biomasa a temperaturas bajas (200 °C).

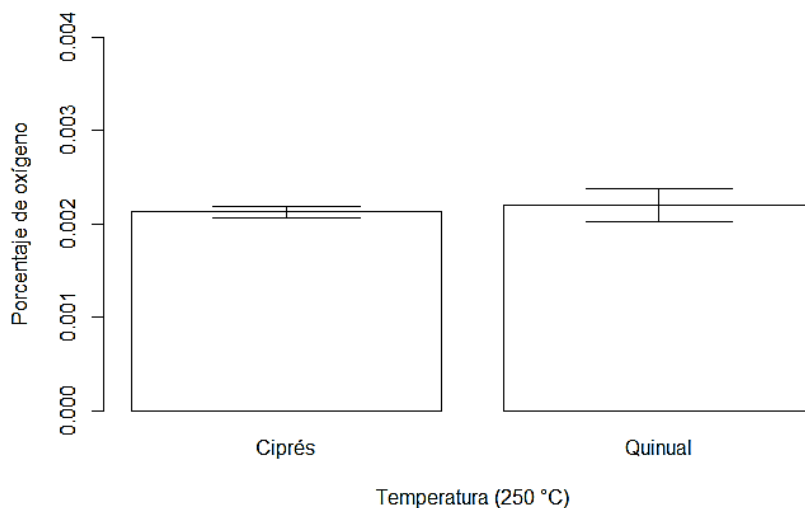
En la (Figura 67) se visualiza el error estándar que aconteció durante la experimentación en la caracterización química del oxígeno total en el biochar producido a 200 °C de temperatura. Donde se comprueba que las dos especies poseen alto margen de error.



**Figura 67:** Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar a 200 °C

Por otro lado a la temperatura de 250 °C, se obtuvo 0.0021 % del contenido promedio de oxígeno en el biochar de ciprés, con un error estándar de 0.000033 y para biochar de quinal se encontró un promedio de 0.0022 %, con un error estándar de 0.0001, a esta temperatura el contenido de oxígeno es despreciable obteniendo así que las dos especies son las mejores por su bajo contenido y poca variabilidad durante la experimentación.

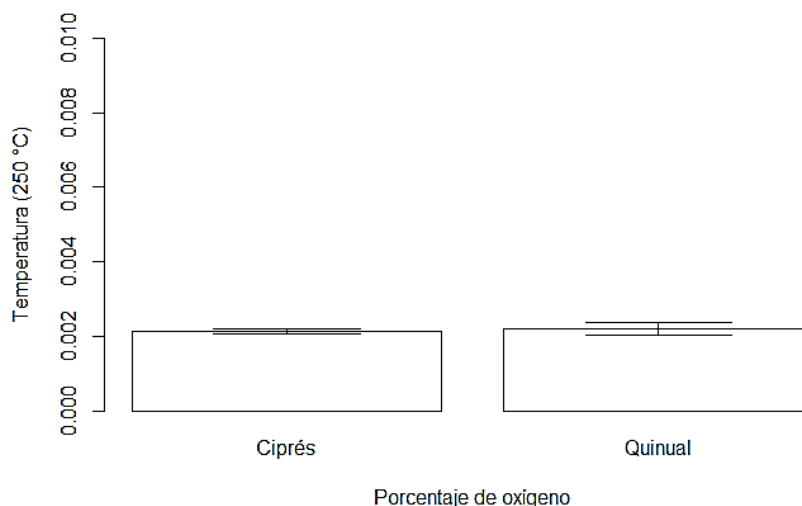
A continuación la (Figura 68), es un gráfico que muestra el error estándar que resultó durante la experimentación en la caracterización química del oxígeno en el biochar producido a 250 °C. Se comprueba que los 2 tipos de biochar presentan menor contenido de oxígeno y el margen de error es mínimo, esto significa que la biomasa combusionó por completo.



**Figura 68:** Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar de ciprés y quinal

A 300 °C de temperatura, se obtuvieron valores despreciables menores a cero, el contenido promedio del oxígeno en el biochar de ciprés fue un valor promedio de 0.003 %, con un error estándar de 0.00021 y para biochar de quinal se consiguió un promedio del 0.0069 %, con un error estándar de 0.0002. Al comparar los 2 tipos de biochar se afirma que, mientras incrementa la temperatura de torrefacción, el oxígeno disminuye, debido a que al combusionar la biomasa sufre un proceso de secado, donde pierde su estructura inicial para transformarse en biochar.

La (Figura 69) representa el error estándar que sucede durante la experimentación de la caracterización química del oxígeno en el biochar producido a 300 °C. Donde se comprueba que, los 2 tipos de biochar presentan un contenido bajo y también el margen de error es mínimo.



**Figura 69:** Error estándar del contenido de oxígeno en el biochar a 300 °C

El contenido de oxígeno varió ampliamente entre las muestras, se demostró que a mayores temperaturas, menor es el contenido de oxígeno en el biochar, debido a que la biomasa rompe sus enlaces de celulosa. Así mismo Martínez & Bohórquez (2017) obtuvieron 13.48 % de oxígeno en biochar a partir de bagazo de caña. La composición química de los 6 tipos de biochar es muy variable, en otro estudio realizado se encontró el 7.2 % de oxígeno en biochar producido a partir de roble blanco, mientras que en biochar de residuos de arroz presentó 9.03 % de oxígeno, lo que pone en manifiesto a su amplia variedad por sus características físicas entre los residuos (Qiu et al., 2008).

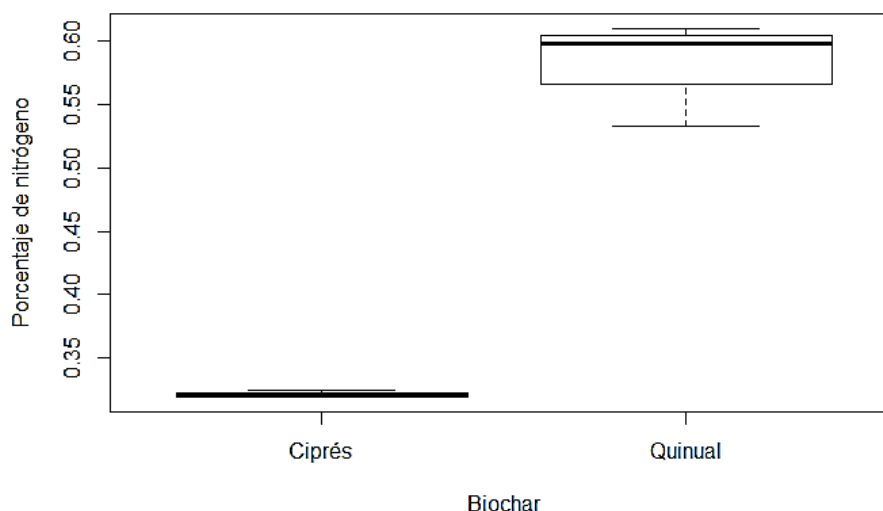
#### 4.5.4 Nitrógeno.

La tabla (39), muestra los resultados del análisis descriptivo realizado con los datos de la (tabla 35) del contenido de nitrógeno y los tratamientos que son las temperaturas de torrefacción en las que se realizó el biochar: 200 °C (T1 y T4), 250°C (T3 y T5) y 300°C (T3 y T6).

**Tabla 39:** Contenido de nitrógeno en el biochar expresado en porcentaje

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo					
		Media	Mediana	DE	CV	EE	
Madera 1	Ciprés	T1	0.25	0.26	0.03	10.28	0.01
		T2	0.53	0.54	0.02	3.38	0.01
		T3	0.50	0.50	0.02	3.70	0.01
Madera 2	Quinual	T4	0.61	0.60	0.03	4.34	0.02
		T5	1.11	1.10	0.01	0.75	0.005
		T6	1.11	1.10	0.01	1.04	0.01

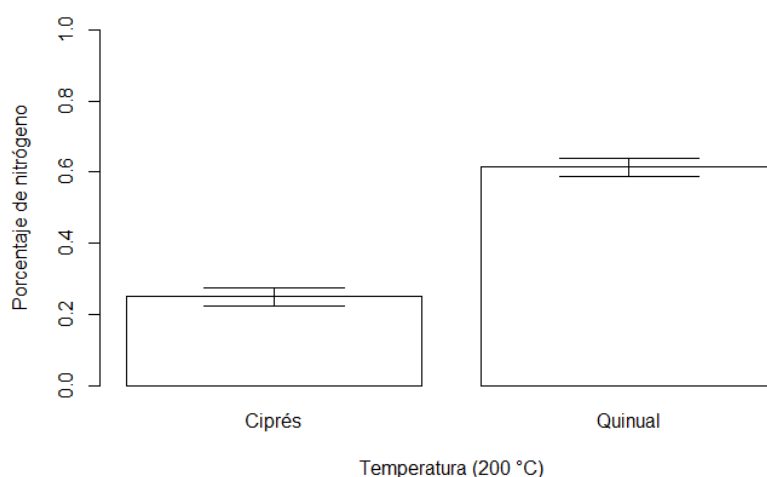
La (Figura 70) es un gráfico elaborado con los resultados del nitrógeno relacionado con los óxidos que se producen durante la combustión para la obtención de biochar, detallados en la (Tabla 35). Se observa que, el biochar de ciprés presenta menor variabilidad en la dispersión de datos y es de bajo contenido, mientras que el biochar de quinual tiene alto contenido. Lo viable es que el biochar tenga menor contenido de nitrógeno, lo que implica menos óxidos de nitrógeno en forma de gas, ya que intervienen en la destrucción de la capa de ozono.



**Figura 70:** Porcentaje de nitrógeno en el biochar de ciprés y quinual

De acuerdo con los datos obtenidos los porcentajes de nitrógeno a temperaturas de 200°C en el biochar obtenido de la especie arbórea ciprés se encontró 0.25 % con un error estándar de 0.01, que corresponde a un intervalo de [0.24 %, 0.26 %] y para quinual fue de 0.61% con una desviación de 0.02, que resulta en un intervalo estimado de [0.59 %, 0.63 %]. Al comparar los 2 tipos de biochar, el de ciprés es el mejor debido a que su contenido es bajo y presenta menor variabilidad durante la experimentación.

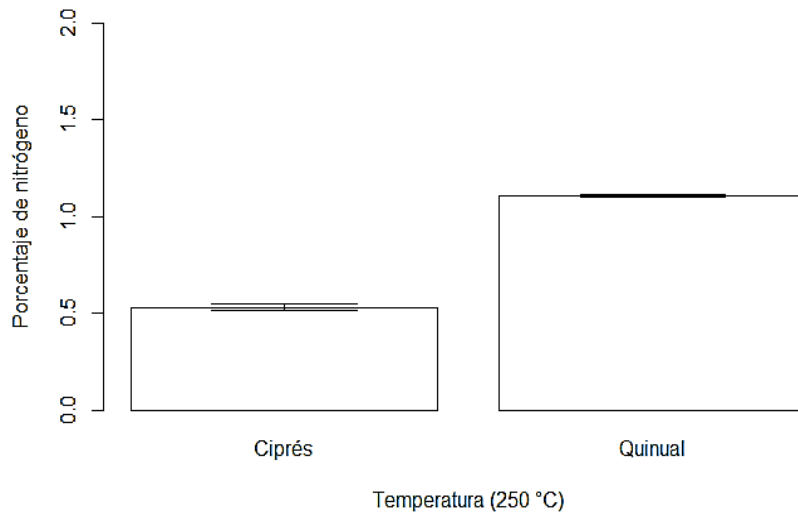
En un estudio realizado por Herrera (2018) encontró 1.6 % de contenido de nitrógeno en biochar de cáscaras de oliva y 0.3 % en madera de abeto, siendo estos valores similares a los tipos de biochar de esta investigación. La (Figura 71) representa el error estándar que sucede durante la experimentación de la caracterización química del nitrógeno en el biochar producido a 200 °C, el cual se comprobó que el biochar de ciprés posee menor margen de error y su contenido es bajo.



**Figura 71:** Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a 200 °C

Al torrefactar la biomasa de ciprés a 250 °C de temperatura se obtuvo 0.53 % de nitrógeno, con un error estándar de 0.01, que resulta en intervalos de [0.52 %, 0.54 %]. De igual manera en biochar de quinual fue de 1.11 % con una desviación de 0.005, que corresponde a un intervalo de [1.10 %, 1.11 %]. Con relación a los dos tipos de biochar la variabilidad es mínima durante la experimentación, el contenido de nitrógeno en el biochar de ciprés es bajo, lo que significa que los óxidos de nitrógeno son mínimos y no genera contaminación atmosférica. Estos porcentajes encontrados son valores coincidentes con lo encontrado en cepas de vid que establece un porcentaje de 0.4 % (Torres Sallan et al., 2014), estos porcentajes varían notablemente debido a que la metodología usada no es la misma.

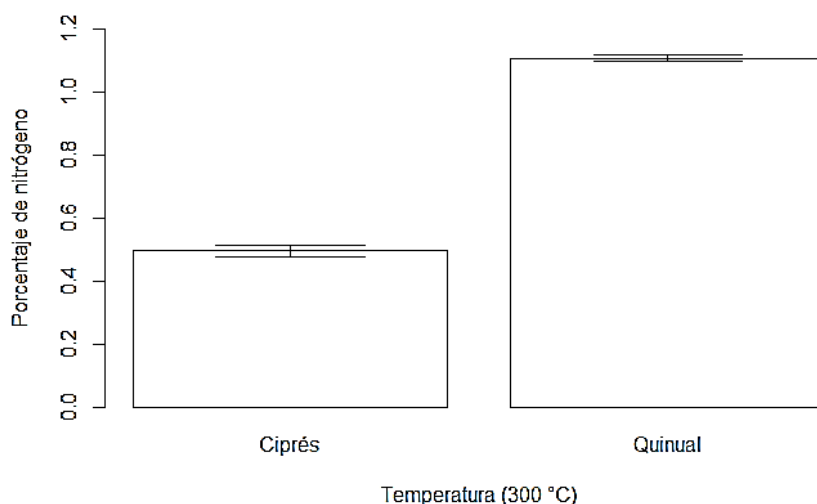
A continuación la (Figura 72), representa el error estándar que ocurrió durante la caracterización de nitrógeno en el biochar, el cual se comprueba que, el biochar de ciprés es el mejor, ya que posee menor margen de error.



**Figura 72:** Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a la temperatura de 250 °C

Sin embargo a 300 °C de temperatura, en el biochar de ciprés el porcentaje promedio de nitrógeno alcanzó el 0.50 % con un error estándar de 0.01, que resulta en un intervalo de [0.49 %, 0.51 %]. Para biochar de quinual se encontró un promedio de 1.11 %, con un error de 0.01, que corresponde a un intervalo de [1.10 %, 1.11 %]. Comparando los 2 tipos de biochar, la variabilidad en la dispersión de resultados es mínima durante la experimentación y su contenido promedio es bajo. GasKin et al, (2008) obtuvo valores de 6.3 % y 6.7% del contenido de nitrógeno en biochar a partir de *Pinus patula*. El aumento de la temperatura, el nitrógeno se volatiliza y los demás nutrientes incrementan. Así mismo Iglesias (2018) menciona que el contenido de nitrógeno en biochar de eucalipto encontró el 0.31 % y 0.84 % a temperaturas mayores de 500 °C, esto podría deberse al método y a las condiciones distintas de producción.

La (Figura 73) representa el error estándar que ocurrió durante la experimentación en la caracterización química del nitrógeno en el biochar producido a 300 °C, en donde se comprueba que, los dos tipos de biochar presentan menor margen de error durante la experimentación.



**Figura 73:** Error estándar del contenido de nitrógeno en el biochar a 300 °C

Al comparar los seis tratamientos se obtuvo que, el porcentaje de nitrógeno es bajo, conforme aumenta la temperatura el nitrógeno incrementa pero no es muy notable, debido a que es un elemento inerte y no presenta reacciones de importancia, es por ello que el biochar producido a 300 °C es el mejor ya que después será aplicado para la germinación, lo que favorece en el crecimiento de las plantas. El nitrógeno es uno de los macronutrientes del biochar, es el más sensible y volátil en el calor y por ende se espera que su contenido sea bajo producido a elevadas temperaturas. Otros estudios realizados por (McLaughlin & Shields, 2009) han demostrado que en el biochar se exhiben niveles bajos de nitrógeno atribuido a su pérdida ya sea como amoníaco u óxidos de nitrógeno durante el proceso de carbonización.

#### 4.5.5 Azufre.

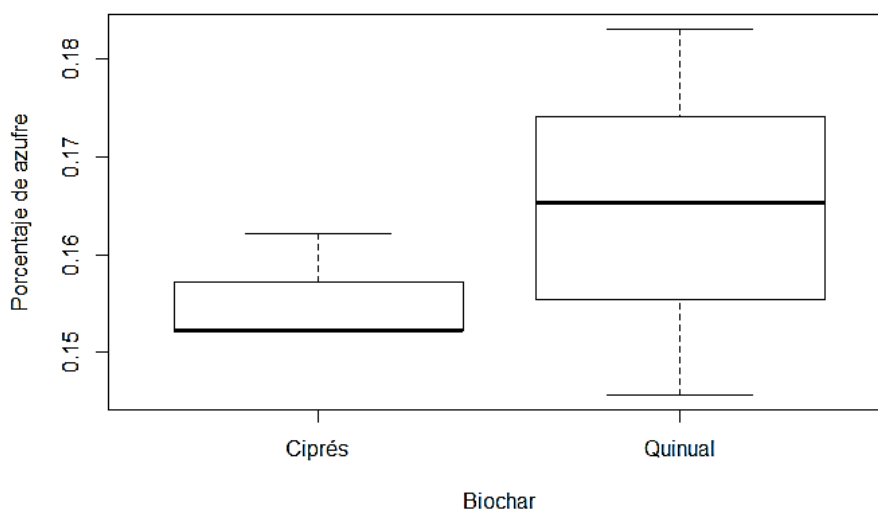
En la (Tabla 40), se muestran los resultados del análisis descriptivo realizado con los datos del contenido de azufre encontrados en la (Tabla 35) relacionado con el dióxido de azufre y sulfatos, en donde los tratamientos hacen referencia a las temperaturas de torrefacción en las que se elaboró el biochar.

**Tabla 40:** Contenido de azufre en biochar expresado en porcentaje

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo					
		media	mediana	DE	CV	EE	
Madera 1	Ciprés	T1	0.99	0.99	0.01	1.06	0.01
		T2	0.02	0.02	0.01	5.40	0.001

Biochar	Tratamientos	Análisis descriptivo				
		media	mediana	DE	CV	EE
Madera 2 Quinual	T3	0.15	0.15	0.00	7.99	0.001
	T4	0.18	0.18	0.01	3.13	0.003
	T5	0.11	0.11	0.01	13.48	0.01
	T6	0.11	0.11	0.01	6.52	0.004

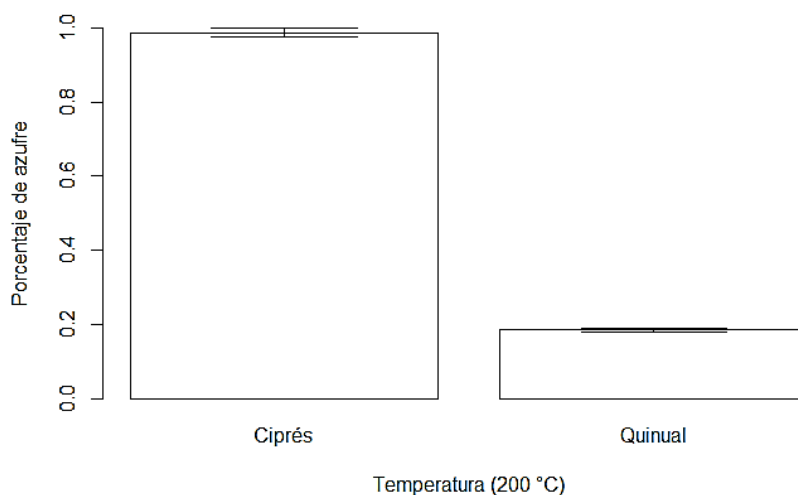
A continuación la (Figura 74) es un gráfico realizado con los resultados de nitrógeno encontrados en la (Tabla 35) en biochar obtenido a 3 temperaturas a partir de los residuos de ciprés y quinual. En donde se comprueba que, los 2 tipos de biochar son de bajo contenido.



**Figura 74:** Porcentaje de azufre en biochar a partir de ciprés y quinual

A 200 °C de temperatura, el contenido de azufre para el biochar de ciprés es de 0.99 %, con un error estándar de 0.01, que corresponde a un intervalo de [0.98 %, 1 %], mientras que para quinual fue de 0.18 %, con un error de 0.003, en un intervalo de [0.17 %, 0.18 %]. Por lo tanto se comprueba que, entre las dos especies su contenido y variabilidad en la dispersión de porcentajes es mínimo durante la experimentación. De acuerdo con un estudio realizado por Alonso et al., (2016) encontró valores bajo cero del contenido de azufre en biochar de cuesco de palma, lo que implica que la biomasa es poco dañino.

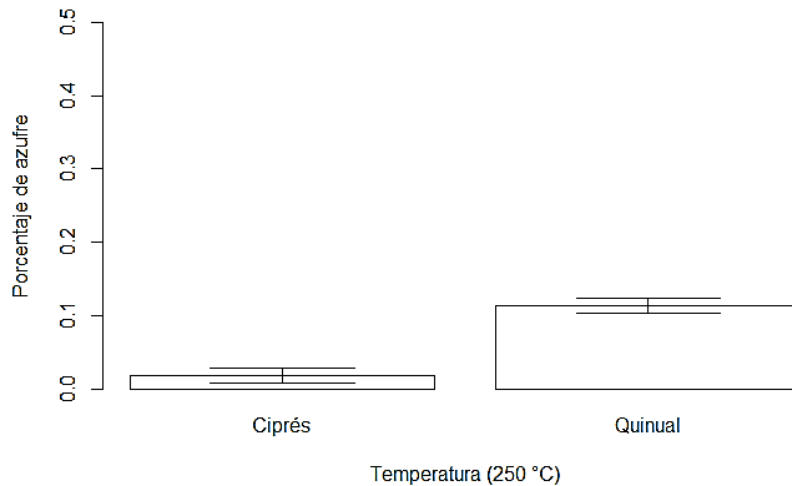
A continuación la (Figura 75) es un gráfico, que representa el error estándar que ocurrió durante la experimentación, en donde se comprueba que, los dos tipos de biochar son los mejores, debido a que las cantidades promedios son de bajo contenido, es decir que este biochar no es ácido.



**Figura 75:** Error estándar del porcentaje de azufre en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura

A 250 °C de temperatura se obtuvo 0.02 % con un error estándar de 0.01 que resulta en un intervalo estimado de [0.02 %, 0.03 %] del porcentaje promedio de azufre para biochar de ciprés y para quinual se encontró un promedio de 0.11 % con error estándar de 0.003, con un intervalo estimado de [0.10 %, 0.11 %]. Los 2 promedios de porcentajes son despreciables, son de poca variabilidad en la experimentación y son factibles para la aplicación en la germinación debido a que no será muy ácido.

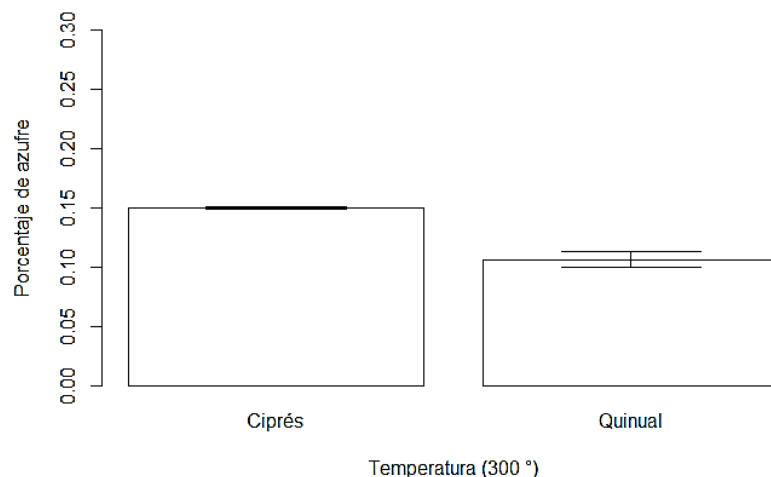
La (Figura 76) es un, que representa el error estándar que sucede durante la experimentación, en donde se comprueba que los dos tipos de biochar son los mejores, debido a que las cantidades promedios son de bajo contenido, es decir que este biochar no es contaminante.



**Figura 76:** Error estándar del contenido de azufre en el biochar a 250 °C

Finalmente a 300°C para el biochar de ciprés fue de 0,15 % con un margen de error de 0.001, en un intervalos de [0.14%, 0.15%], y para quinual el contenido de azufre fue de 0,11%, con un error estándar de 0.004, que resulta en un intervalo estimado de [0.10%, 0.12%], por lo tanto se puede asumir que al comparar las dos especies el promedio del porcentaje es bajo y es de menor variabilidad en la experimentación, obteniendo así que los dos tipos de biochar son factibles para la aplicación en la germinación debido a que no es muy ácido. Lo que se corrobora con el estudio de Martínez & Bohórquez (2017) el cual encontró 0.16% de azufre en biochar a partir de bagazo de caña, valor similar a los resultados, el porcentaje de variación es debido al método de producción, lugar y las características químicas del bagazo.

La (Figura 77) es un gráfico, en donde se comprueba que, los dos tipos de biochar poseen contenidos promedios bajos, lo que implica que su contenido es despreciable y no presenta mayor margen de error.



**Figura 77:** Error estándar del contenido de azufre en el biochar a 300 °C

Al comparar entre los 6 tratamientos se confirma que el contenido de azufre es despreciable conforme incrementa la temperatura y no genera mayor impacto atmosférico. Todos los tratamientos presentan datos completamente homogéneos en cuanto a la dispersión, ya que son menores a cero y de poca variabilidad durante la experimentación. Por lo que es factible pirolizar la biomasa en altas temperaturas ya que el porcentaje de azufre obtenido es mínimo.

La composición del biochar varía de acuerdo al tipo de materia prima empleada, sin embargo se encuentra compuesto por una concentración variada de otros elementos como el azufre (S), asociados con los óxidos de azufre emitidos durante la combustión de la madera. Méndez (2017) señala que el contenido de azufre disminuye en el biocarbón de un 68.75 % a 21.88 %, lo cual se puede asociar a la descomposición que se da del contenido de azufre orgánico cuando la biomasa se somete a temperaturas altas. Entonces se confirma que, a mayor temperatura menor será el contenido de azufre.

#### **4.6 Análisis de humedad y material volátil del biochar**

Este análisis tuvo como propósito corregir el contenido de humedad de la biomasa y caracterizar el contenido de materia volátil sometiendo a 3 temperaturas (200 °C, 250 °C y 300 °C) mediante el análisis termogravimétrico, para estos análisis se realizaron 9 repeticiones por tipo de biomasa.

##### **4.6.1 Humedad.**

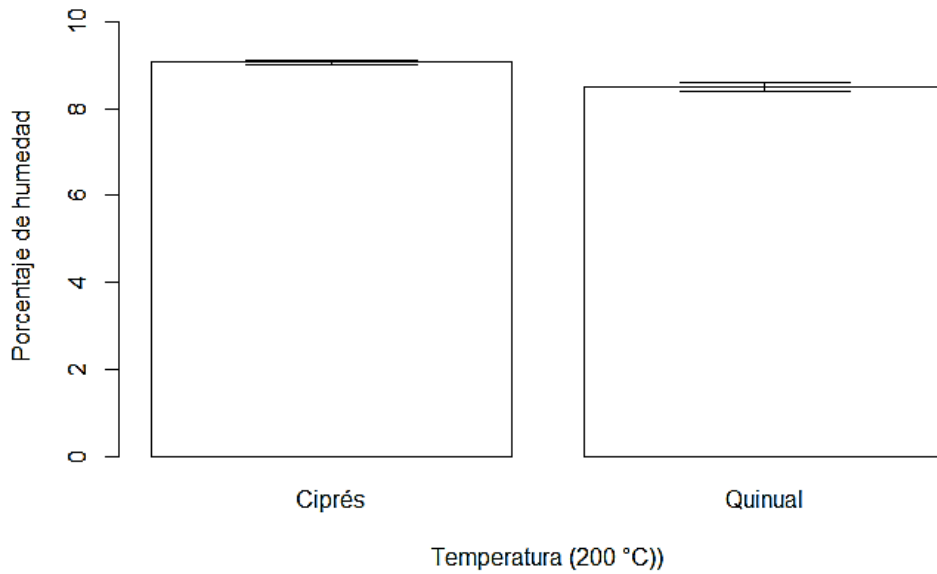
En la (Tabla 41), se muestran los resultados del análisis descriptivo realizado con los datos corregidos del contenido de humedad con la que ingresa la biomasa, donde los tratamientos hacen referencia a las temperaturas de torrefacción en las que se realizó el biochar.

**Tabla 41:** Contenido de humedad en la biomasa para la producción de biochar expresado en porcentaje

Especies	Tratamientos	Análisis descriptivo				
		Media	Mediana	DE	CV	EE
Madera 1 Ciprés	T1	9.07	9.07	0.05	0.55	0.02
	T2	8.57	8.53	0.08	0.93	0.03
	T3	8.51	8.51	0.07	0.81	0.02
Madera 2 Quinual	T4	8.49	8.53	0.09	1.07	0.03
	T5	8.18	8.16	0.05	0.60	0.02
	T6	8.02	8.00	0.06	0.78	0.02

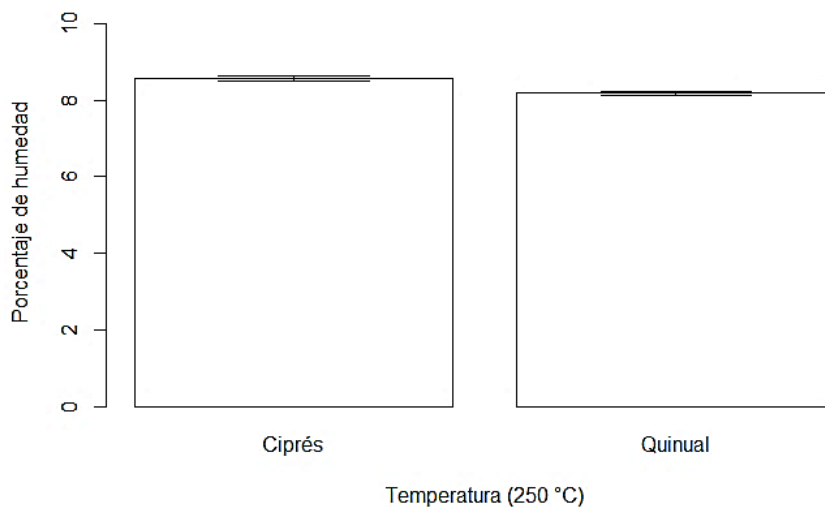
El contenido de humedad presente en el biochar depende del contenido de humedad con la que ingresa la biomasa, la pérdida de humedad se debe a que al aumentar la temperatura se rompen los enlaces intermoleculares y la biomasa pierde la capacidad de formar puentes de hidrógeno. Al comparar los 6 tratamientos, se comprobó que a bajas temperaturas el contenido de humedad es alto por lo que la biomasa no se ha combustionado por completo, mientras que a temperaturas altas la humedad va disminuyendo por lo que sería factible torrefactar en altas temperaturas.

En la temperatura de 200 °C se obtuvo un porcentaje promedio de 9.07 % en la biomasa de ciprés con un error estándar de 0.02, que resulta en un intervalo de [9.05 %, 9.09 %], mientras que en la biomasa de quinual fue de 8.49 % con un error estándar de 0.03, que corresponde a un intervalo estimado de [8.46 %, 8.52 %]. Al comparar los 2 resultados es notable la pérdida de humedad en los dos tipos de biochar debido a que al torrefactar la biomasa pierde el contenido de agua, además presentó menor variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación. La (Figura 78) presenta el margen de error que se efectuó durante la experimentación, en donde se comprueba que los dos tipos de biochar poseen contenidos bajos y no presentan un significativo margen de error.



**Figura 78:** Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 200 °C de temperatura

Por otro lado a 250 °C de temperatura se obtuvo 8.57 % con un error estándar de 0.02, en un intervalo estimado de [8.55 %, 8.59 %] del contenido de humedad con la que ingresa la biomasa de ciprés y en la biomasa de quinual fue de 8.18 % con una error estándar de 0.02, en un intervalo de [8.16 %, 8.20 %], en donde la variación del contenido de humedad en la biomasa de quinual es mínima. La (Figura 79) representa el error estándar durante la experimentación, en donde se comprueba que la especie quinual tiene menor variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación.

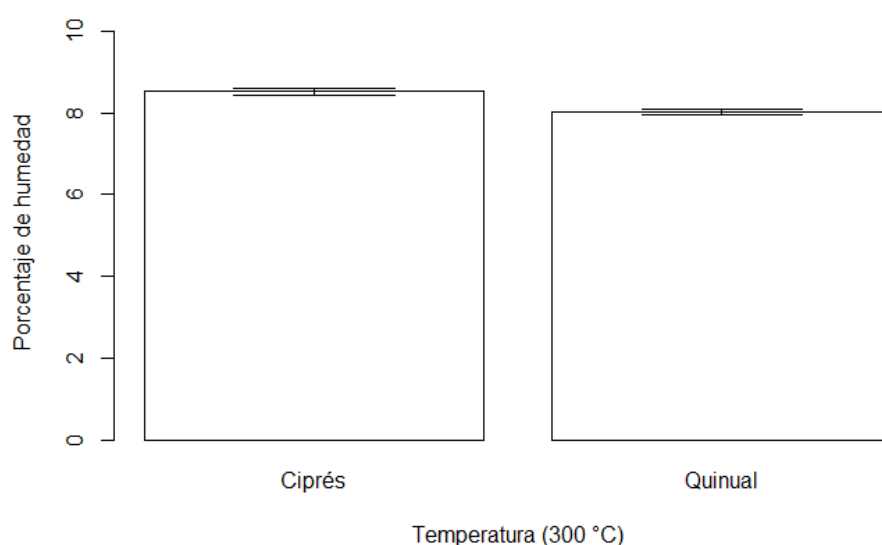


**Figura 79:** Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 250 °C de temperatura

Las plantas están formadas principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de extraíbles y minerales, aunque la constitución química depende de la especie botánica y del órgano vegetal o residuo de la planta. Al torrefactar esta biomasa a 300 °C de temperatura se consiguió un porcentaje promedio de 8.51 % del contenido de humedad en la biomasa de ciprés, con un error estándar de 0.02, que corresponde a un intervalo de [8.49 %, 8.53 %]. Mientras que la biomasa de quinal presentó un promedio 8.02 % con un error estándar de 0.02 que resulta en un intervalo de [8.00 %, 8.04 %].

Entre los 2 tipos de biomasa es notable la disminución de la humedad, por lo que se comprueba que a temperaturas altas el contenido de humedad disminuye, debido a que la biomasa durante la producción de biochar pierde su estructura por completo y se rompen los enlaces de hidrógeno/oxígeno. Los resultados obtenidos son similares al estudio realizado por Bermeo (2018) el cual encontró un valor promedio de humedad del 9.25 %. Otro estudio realizado por Moreno (2018) encontró 0.99 % de humedad en biomasa de eucalipto, existe diferencia significativa con los sustratos de estudio debido a muchos factores como la variabilidad natural que existe dentro de la misma especie, clima y condiciones experimentales durante la experimentación.

Lo expuesto anteriormente se comprueba en la (Figura 80), donde se muestra que la biomasa de quinal posee menor variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación.



**Figura 80:** Error estándar del contenido de humedad corregida en la biomasa a 250 °C de temperatura

La pérdida de humedad se debe al aumento de la temperatura el cual se rompen los enlaces intermoleculares y pierde la capacidad de formar puentes de hidrógeno. Al comparar los seis tratamientos, se encontró que a temperaturas bajas (200 °C) el contenido de humedad es alto debido a que la biomasa no se ha combustionado por completo, mientras que a temperaturas altas (300 °C), la humedad va disminuyendo por lo que sería factible torrefactar a temperaturas mayores de 300 °C.

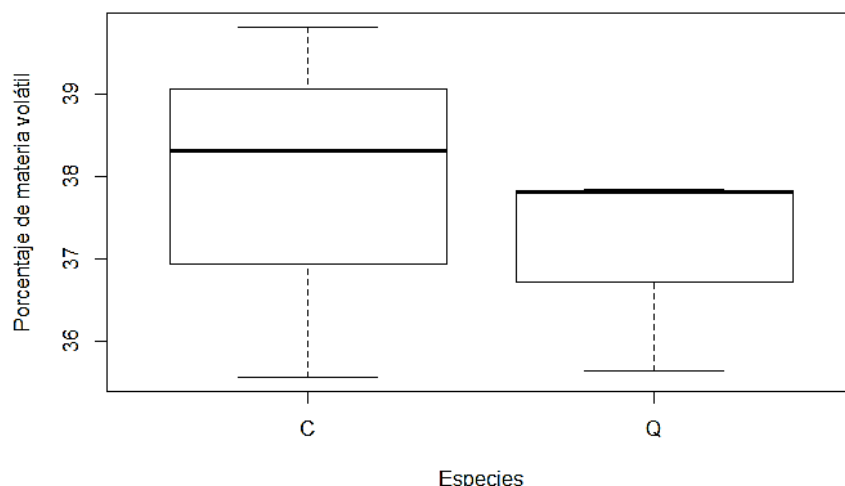
#### 4.6.2 Materia Volátil.

Se produce cuando la biomasa se transforma en biochar, al torrefactar la misma desprende diferentes gases a la atmosfera. La (Tabla 42) manifiesta los resultados encontrados para los 6 tipos de biochar.

**Tabla 42:** Contenido de materia volátil en el biochar a 3 temperaturas de torrefacción expresado en porcentaje

Temperatura	Biochar	Repeticiones								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
200	Ciprés	85.72	85.62	85.76	86.71	85.77	85.82	85.59	85.77	85.87
250	Ciprés	41.73	43.03	43.08	43.96	43.32	43.83	42.96	43.87	42.42
300	Ciprés	26.94	26.55	26.53	27.43	26.69	27.29	26.24	27.47	26.98
200	Quinual	82.91	83.03	83.13	83.14	83.37	82.97	83.17	83.4	83.11
250	Quinual	40.81	41.16	40.53	40.62	40.86	40.03	40.24	38.67	41.45
300	Quinual	20.36	21.12	21.85	21.76	21.72	21.54	21.64	21.27	20.73

La (Figura 81) es un gráfico construido con los resultados de materia volátil descritos en la (Tabla 42) del biochar obtenido. Donde se muestra que los 2 tipos de biochar presentan poca variabilidad en cuanto a la dispersión de datos, y el contenido es de ligera variación.



**Figura 81:** Contenido de materia volátil en el biochar a partir de ciprés (C) y quinual (Q)

La (Tabla 43) describe los resultados del análisis descriptivo realizado con los porcentajes promedios de materia volátil encontrados (Tabla 43) durante la torrefacción para la obtención de biochar.

**Tabla 43:** Contenido de material volátil del biochar expresado en porcentaje

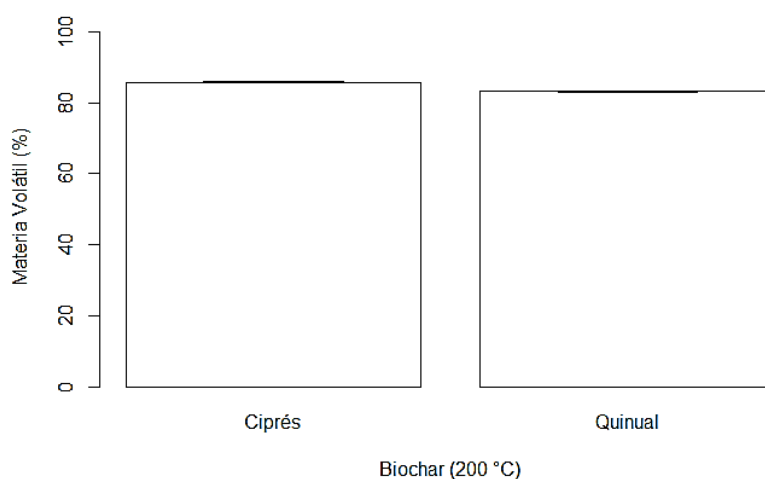
Biochar	Temperatura	Análisis descriptivo				
		Media	Mediana	DE	CV	EE
Ciprés	200	85.74	85.76	0.19	0.10	0.03
	250	43.13	43.08	0.73	1.69	0.24
	300	26.90	26.94	0.43	1.61	0.14
Quinual	200	83.14	83.13	0.16	0.20	0.05
	250	40.49	40.62	0.81	1.99	0.27
	300	21.33	21.54	0.51	2.40	0.17

A 200 °C de temperatura empieza la formación de CO<sub>2</sub>, CO, vapor de H<sub>2</sub>O y carbonizado, la celulosa forma menos carbonizado y más material volátil (Pantoja, 2015). Sin embargo en el biochar a partir de ciprés se adquirió un valor promedio de 85.74 % con un error estándar de 0.03 que corresponde a un intervalo de [85.71 %, 85.77 %] del contenido de materia volátil. En el biochar obtenido de quinual se encontró un promedio de 83.14 % con error estándar de 0.05 en intervalos de [82.09 %, 83.19 %]. Obteniendo así promedio de contenido de volátiles altos y no son favorables para los procesos de combustión de la biomasa por lo que desprende gran cantidad de gases.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones el valor promedio de materia volátil obtenido en biochar de pinus patula en el estudio de Castro (2018) fue de 51.76 %. Así mismo Lara et al., (2013) encontró un valor promedio de 65.38 % y 56.23 % en

biochar de tallo de algodón y en el biochar de árbol de olivo el contenido de volátiles luego de la torrefacción resultó ser de 70 % y 76.2 %.

Lo expuesto anteriormente se comprueba con el gráfico de la (Figura 82) en donde se comprueba que el biochar de ciprés y quinal presentan menor variabilidad durante la experimentación pero son de alto contenido lo que se comprueba que a temperaturas bajas (200 °C) el contenido de volátiles son altos.

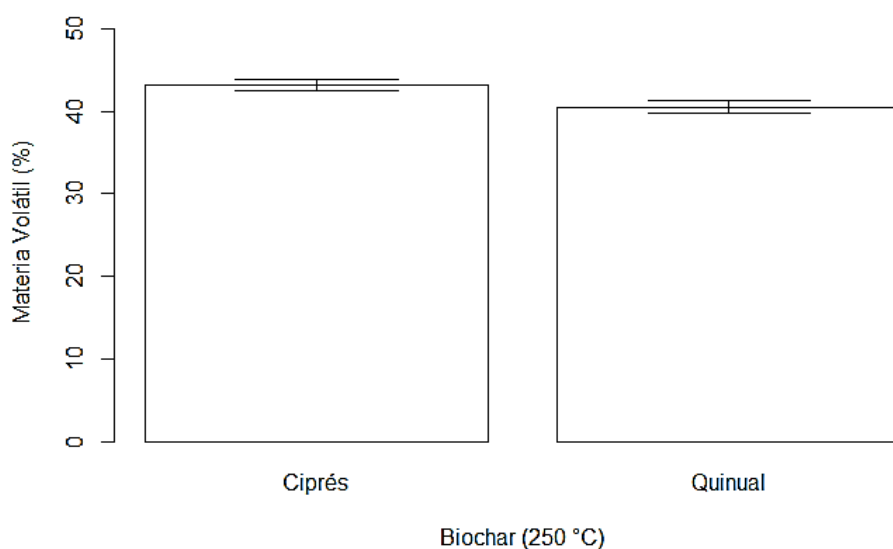


**Figura 82:** Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura

Sin embargo a 250 °C de temperatura continua generándose carbonizado, CO<sub>2</sub>, CO e inicia la formación de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>, debido a la rápida degradación térmica, al analizar el contenido de volátiles en biochar de ciprés a 250 °C de torrefacción se encontró un valor promedio de 43.13 % con error estándar de 0.24 que corresponde a un intervalo de [42.89 %, 43.37 %]. De igual manera en el biochar de quinal se consiguió un promedio de 40.49 % con un error estándar de 0.27, que resulta en un intervalo estimado de [40.22 %, 40.76 %]. Al comparar los 2 tipos de biochar se demuestra que biochar de quinal es el mejor ya que su contenido es bajo que implica menos contaminantes hacia la atmósfera por ser una madera blanda, en cuanto a su dispersión durante la experimentación es poco variable.

Los resultados obtenidos se compararon con el estudio realizado por Baray (2016) el cual pirolizó residuos de poda de árboles de manzana a 250 °C y encontró un valor promedio de 81.32 % con menor cantidad de CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, esto ocurre por la degradación de la hemicelulosa y parcialmente la celulosa y la lignina a partir de esta temperatura las reacciones que absorbían calor (endotérmicas) pasan a liberarlo (exotérmicas). La (Figura 83) representa el error estándar del contenido de materia

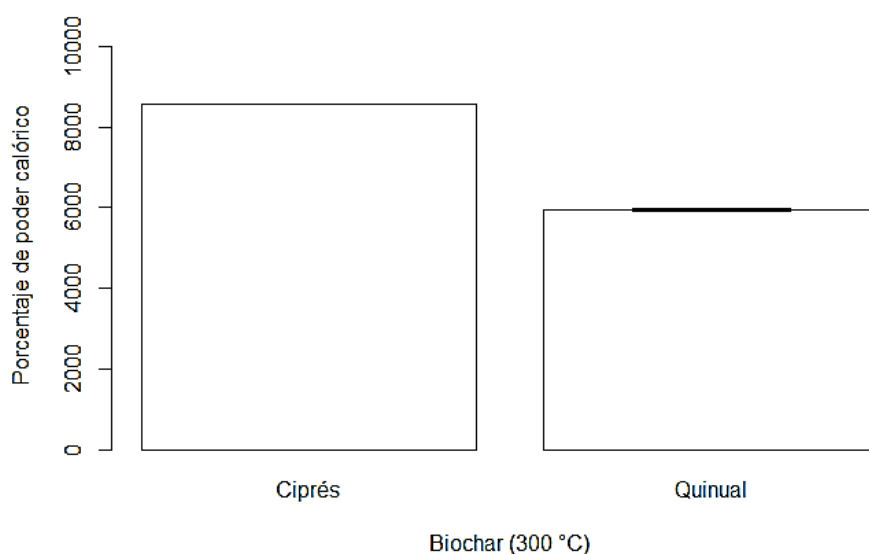
volátil durante la experimentación en el biochar de las 2 especies de estudio, el cual se comprueba que el biochar de quinal tiene bajo contenido de volátiles, es de menor variabilidad en la dispersión de datos y no genera en gran cantidad contaminantes hacia la atmósfera.



**Figura 83:** Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 250 °C de temperatura

Finalmente a 300 °C de temperatura, la biomasa combustiona y se producen gases como CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (etileno), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (etano) y otros hidrocarburos pesados, en el biochar obtenido a partir de la especie vegetal ciprés presentó 26.90 % de contenido de material volátil con un error estándar de 0.14, que resulta en un intervalo estimado de [26.76 %, 27.04 %]. De igual manera en el biochar de quinal se encontró un promedio de 21.33 % con un error estándar de 0.17 en intervalos de [21.16 %, 21.5 %]. Al comparar los 2 tipos de biochar se confirma que, el biochar de quinal tiene menor promedio de materia volátil a mayores temperaturas (300 °C). Por otro lado el biochar de ciprés posee ligera variación en su contenido a mayores temperaturas. De acuerdo con un estudio realizado por Méndez (2017) obtuvo un valor de 28.7 % de material volátil en biochar de *pinus patula* que fue pirolizado a 300 °C de temperatura, valor similar de acuerdo con los resultados obtenidos, esto puede variar por el método de producción y las condiciones climatológicas.

La (Figura 84) señala el error estándar para el biochar durante la caracterización de materia volátil, en donde el biochar de quinal tiene bajo contenido de volátiles, es de menor variabilidad, por lo que no forma en gran cantidad contaminantes que causen daño a la capa atmosférica.



**Figura 84:** Error estándar del contenido de materia volátil en el biochar obtenido a 300 °C de temperatura

Al comparar los 6 tratamientos se confirma que mientras mayor es la temperatura, menor es el contenido de materia volátil, siendo favorable al momento de pirolizar biomasa de ciprés y quinual a temperaturas mayores de 250 °C, ya que las emisiones no son contaminantes.

#### 4.7 Contenido de poder calórico en el biochar a partir de ciprés y quinual

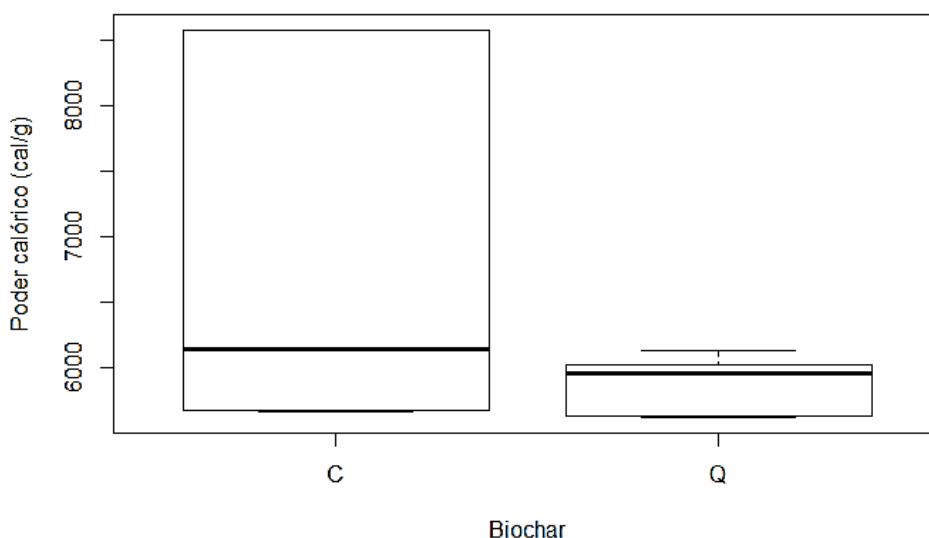
El poder calórico del biochar expresa su potencial energético para un posterior uso como combustible, es por ello que en la (Tabla 44) se detallan los resultados del contenido de poder calórico en los 6 tipos de biochar producido a 3 temperaturas (200 °C, 250 °C y 300 °C), este análisis se realizó con 3 repeticiones.

**Tabla 44:** Contenido de poder calórico en los 6 tipos de biochar expresado en cal/g

Temperatura	Especies	Repeticiones		
		I	II	III
200	Ciprés	5670.2	5679.6	5674
250	Ciprés	6144.1	6145.1	6142.6
300	Ciprés	8574.4	8578.4	8578.5
200	Quinual	5628.1	5630.8	5625.3
250	Quinual	6027.6	6126.8	6127.8
300	Quinual	5874.8	5991.5	8954.6

Las moléculas que constituyen la biomasa se rompen liberando compuestos volátiles cuando se someten a efectos térmicos. Un incremento de la temperatura refuerza este fenómeno, lo que explica el descenso del contenido de materia volátil y el aumento en el contenido de carbono. El poder calorífico del biocarbón, se incrementa con la temperatura de torrefacción, pasando de 5 674 cal/g en el biocarbón de ciprés obtenido a 200 °C a 8 578.5 cal/g obtenido a 300 °C. Así mismo para el biochar de quinual se obtuvo un promedio de 5 625.3 cal/g obtenido a 200°C de temperatura a 5 625.3 cal/g a 300 °C. Un incremento de la temperatura de torrefacción, mejora la calidad de los biocarbones y aumenta la concentración de carbono y poder calorífico.

La (Figura 85) muestra los resultados del poder calorífico descritos en la (Tabla 45) en el biochar obtenido a 3 temperaturas, los dos tipos de biochar se comprobó que el biochar de ciprés presenta un mayor contenido al igual que el biochar de quinual, además los 2 poseen poca variabilidad en la dispersión de datos durante la experimentación. Según investigaciones se ha comprobado que un poder calorífico alto (mayor 3000) es factible para ser utilizado como combustible, es por ello que cumple con este requisito el biochar obtenido a partir de ciprés.



**Figura 85:** Poder calorífico en el biochar obtenido a 3 temperaturas (ciprés (C); Quinual (Q))

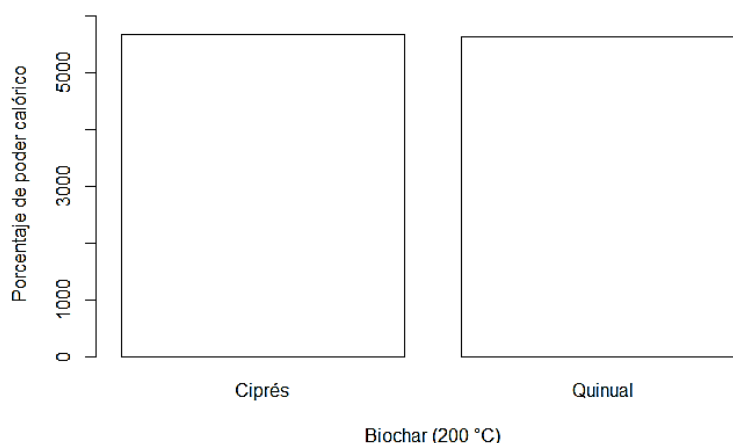
En la (Tabla 45) se detallan los resultados del análisis descriptivo del poder calorífico para los 2 tipos de maderas que se torrefactaron a 3 temperaturas 200 °C (T1 y T4), 250 °C (T2 y T4) y 300 °C (T3 y T6).

**Tabla 45:** Contenido de poder calórico superior del biochar expresado en cal/g

Biochar	Temperatura	Análisis descriptivo				
		Media	Mediana	DE	CV	EE
Ciprés	T1	5674.60	5674.00	4.73	0.08	2.73
	T2	6143.93	6144.10	1.26	0.02	0.73
	T3	8577.10	8578.40	2.34	0.03	1.35
Quinual	T4	5628.07	5628.10	2.75	0.05	1.59
	T5	6094.07	6126.80	1.30	0.94	33.23
	T6	8940.30	8954.60	2.30	1.00	34.44

De acuerdo con los resultados obtenidos del contenido de poder calórico superior del biochar descritos en la (Tabla 45) señala que a 200 °C de temperatura se obtuvo 5 674.6 cal/g del contenido de poder calórico en el biochar de ciprés con un error estándar de 2.73, que resulta en un intervalo estimado de [5 671.87cal/g, 5 677.33 cal/g]. En el biochar de quinual se encontró un valor promedio de 5 628.07 cal/g, con un error estándar de 1.59 que corresponde a un intervalo de [5 623.73 cal/g, 5 625.32 cal/g].

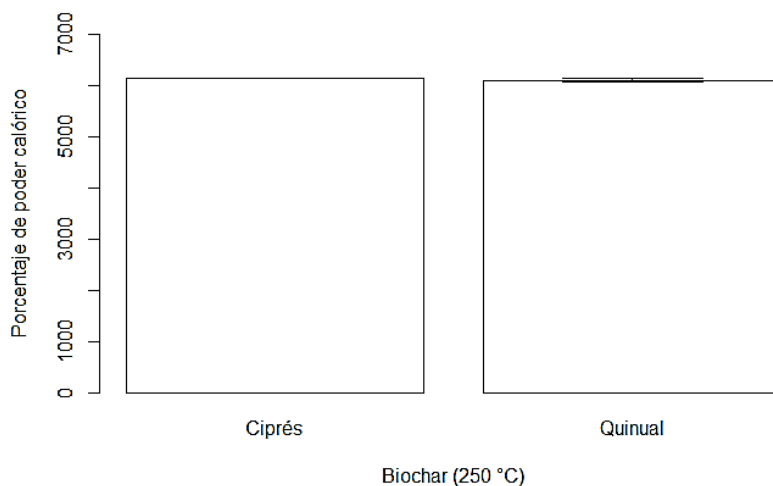
Al comparar los 2 tipos de biochar resultan tener alto promedio y poca variabilidad. Estos resultados son similares al estudio realizado por Bermeo (2018) donde obtuvo 6 474.53 cal/g de poder calórico en biochar de residuos de balsa torrefactado a 220 °C. Entre los resultados presentan ligera variación debido a la estructura y característica de los residuos utilizados. Lo expuesto anteriormente se demuestra en la (Figura 86) que representa el error estándar que sucedió durante la experimentación.



**Figura 86:** Error estándar del contenido de poder calórico en el biochar obtenido a 200 °C de temperatura

A 250 °C de temperatura el poder calórico en el biochar de ciprés es de 6 143.93 cal/g, con un error estándar de 0.73, que resulta en un intervalo de [6 143.2 cal/g, 6 144.66 cal/g] y para quinual el contenido promedio del poder calórico es de 6 094.07

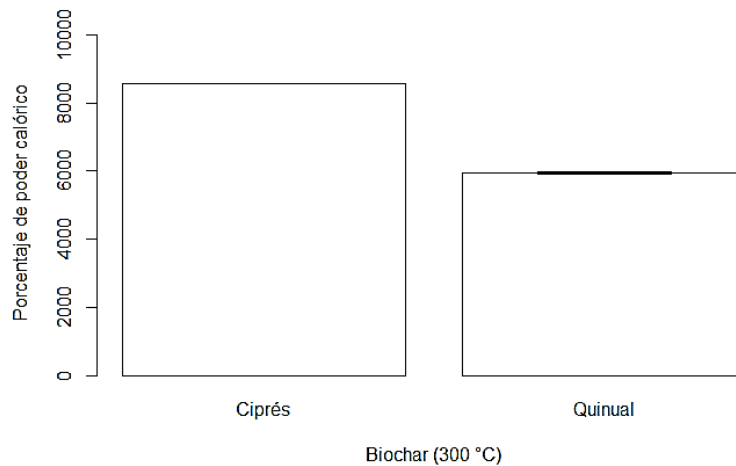
cal/g, con un error estándar de 33.23, que corresponde a un intervalo de [6 060.84 cal/g, 6 127.3 cal/g]. Estos tipos de biochar presentan poca variabilidad en cuanto a la dispersión de datos, por lo que se consiguió que el biochar de ciprés posee alto contenido siendo el mejor para usarlo como combustible. En la (Figura 87) se demuestra lo expuesto anteriormente, donde se confirma que el biochar a partir de ciprés es de menor variabilidad durante el experimento debido a que su margen de error es mínimo.



**Figura 87:** Error estándar del poder calórico en el biochar obtenido a 250 °C de temperatura

Por otro lado a 300 °C de temperatura el porcentaje promedio de poder calórico en el biochar de ciprés es de 8 577.10 cal/g, con error estándar de 1.35 que corresponde a un intervalo de [8 575.75 cal/g, 8 578.45 cal/g]. En el biochar de quinal el contenido promedio del poder calórico es de 8 940.30 cal/g, con un error estándar de 34.44 que resulta en un intervalo estimado de [8 905.86cal/g, 8 974.74cal/g].

Tomando en cuenta los 2 tipos de biochar poseen poca variabilidad en cuanto a la dispersión de datos, además el biochar de quinal es el que tiene alto contenido es viable para usarlo como combustible. En comparación con el estudio de Castro (2018) a 300 °C y 400 °C de temperatura encontró valores promedios de 6 214.15 cal/g (25 MJ/kg y 26 MJ/kg) del contenido de poder calórico en biochar a partir de Pinus patula, estos valores son pocos semejante con los resultados encontrados debido a que la forma de producción no es la misma y las condiciones climatológicas son diferentes. La (Figura 88) es un gráfico que demuestra lo expuesto anteriormente, en donde se comprueba que el ciprés es de mayor contenido y de poca variabilidad durante la experimentación.



**Figura 88:** Error estándar del contenido de poder calórico en el biochar obtenido a 300 °C de temperatura

Al comparar los 6 tratamientos se obtiene que el poder calórico aumentó de forma considerable, en donde el mayor aumento se observa en las muestras de biochar de ciprés a 250 °C y en biochar de quinual a 300 °C, mientras mayor sea el contenido de poder calórico convierte al biochar como una alternativa para el uso como combustible. De acuerdo con el estudio de Gómez et al., (2016) encontró 6 978.9 cal/g de poder calórico en biochar de la cáscara de almendra del fruto de la palma (cuesco), estos resultados son poco similares varía debido a que el autor pirolizó a 320 °C de temperatura.

#### **4.8 Evaluación de biochar en la germinación de semillas de trigo (*Triticum vulgare*)**

##### **4.8.1 Hábito, crecimiento y desarrollo.**

El trigo es un cultivo de estación fría, atraviesa por distintos estados y cada uno de ellos es marcado por la formación de partes específicas de la planta. En este trabajo se enfatiza la escala de Zadoks para describir con más detalle todo el ciclo del cultivo del trigo. Durante la germinación (0 días a 09 días), el periodo de crecimiento (10 días a 19 días), el macollaje (20 días a 30 días). El ciclo de vida de la planta de trigo puede ser dividida en dos períodos: primero, hace referencia al crecimiento vegetativo que inicia con el desarrollo de la estructura fotosintética hasta el desarrollo de la espiga, y la segunda fase de llenado del grano. Si bien son requeridas las mejores condiciones climáticas durante todo el ciclo de germinación (Moreno et al., 2001).

#### 4.8.2 Biochar como aditivo para la germinación de trigo.

El proceso de germinación resultó en un efecto positivo con el uso de biochar para el desarrollo de las plántulas de *Triticum vulgare* durante todas sus fases. El nitrógeno fue el nutriente más importante debido a que es el responsable directo en el crecimiento del tallo, ramas y raíz, sin este sustento las plantas disminuyen el crecimiento, por lo que muestran características en las hojas ya que se vuelven pequeñas llegando a caerse, intervienen en la multiplicación celular y se considera factor de crecimiento (Abenza, 2012).

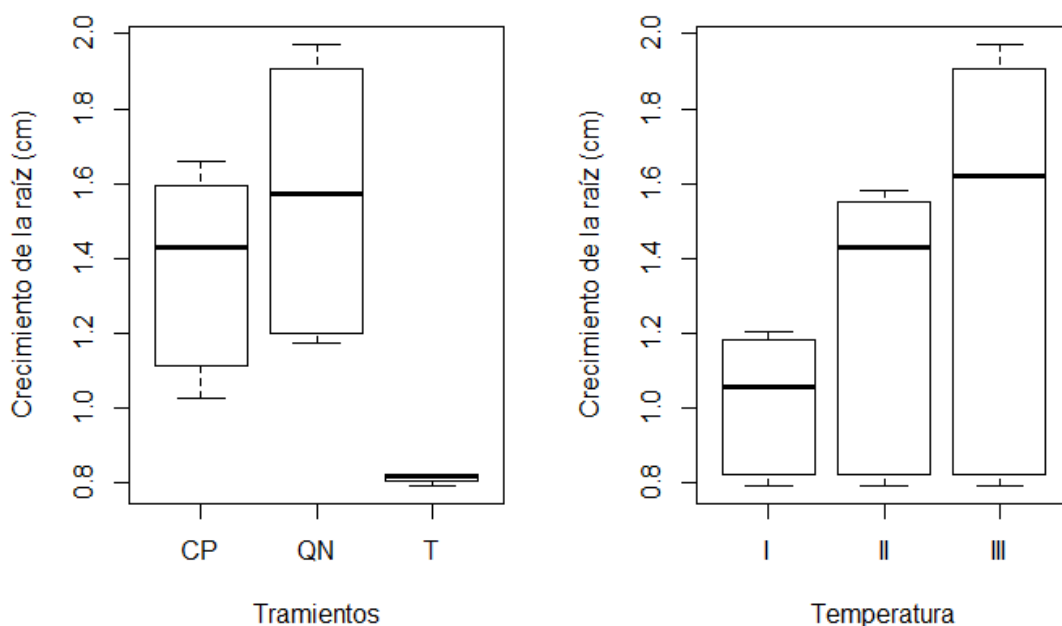
A continuación en la (Tabla 46) se detalla los valores promedio del crecimiento semanal de la raíz expresado en cm, con un tiempo de duración de 30 días, el experimento consta de tres tratamientos: Ciprés, quinal y un testigo, los cuales fueron realizados con una dosis de 1:10 (1 gramo de biochar por 10 ml de agua desionizada) para cada temperatura de producción.

**Tabla 46:** Promedio de la tasa de crecimiento semanal de la raíz expresado en cm

Tratamiento	Temperatura del biochar								
	200 °C		Promedio	250 °C		Promedio	300 °C		Promedio
Ciprés	1.15	1.08	1.07	1.43	1.44	1.43	1.58	1.63	1.62
	1.03	1.03		1.43	1.43		1.66	1.60	
Quinal	1.20	1.19	1.19	1.58	1.56	1.56	1.97	1.92	1.80
	1.19	1.17		1.54	1.58		1.89	1.97	
Testigo	0.79	0.82	0.81	0.79	0.82	0.81	0.79	0.82	0.81
	0.82	0.81		0.82	0.81		0.82	0.81	

La tasa promedio de crecimiento semanal de la raíz con el biochar de ciprés elaborado a 300 °C tuvo un mayor efecto, donde se consiguió un valor de 1.62 cm, mientras que, con los dos tipos de biochar obtenidos a 200 °C y 250 °C fueron de 1.07 cm y 1.43 cm respectivamente. Por otro lado para el biochar de quinal elaborado a 300 °C, la tasa promedio de crecimiento semanal de la raíz fue de 1.80 cm, este tratamiento presentó un mejor rendimiento. Con respecto al testigo, la tasa de crecimiento alcanzó 0.81 cm, al ser un tratamiento comprendido por agua, debido a que las plántulas presentaron deficiencia de nutrientes para efectuar su desarrollo, por ello no demostró un rendimiento mayor, al comparar con todos los tratamientos existe diferencia significativa.

La (Figura 89) es un gráfico elaborado con los datos de la (Tabla 47) donde representa el promedio de crecimiento semanal de la raíz. La representación gráfica hace referencia a los tratamientos: ciprés (CN), quinal (QN) y testigo (T) y la temperatura de producción del biochar: I (200 °C), II (250 °C) y III (300 °C), para identificar diferencias significativas, asimetrías, valores atípicos y homogeneidad de varianza entre los distintos tratamientos.



**Figura 89:** Tasa de crecimiento semanal de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas de producción del biochar

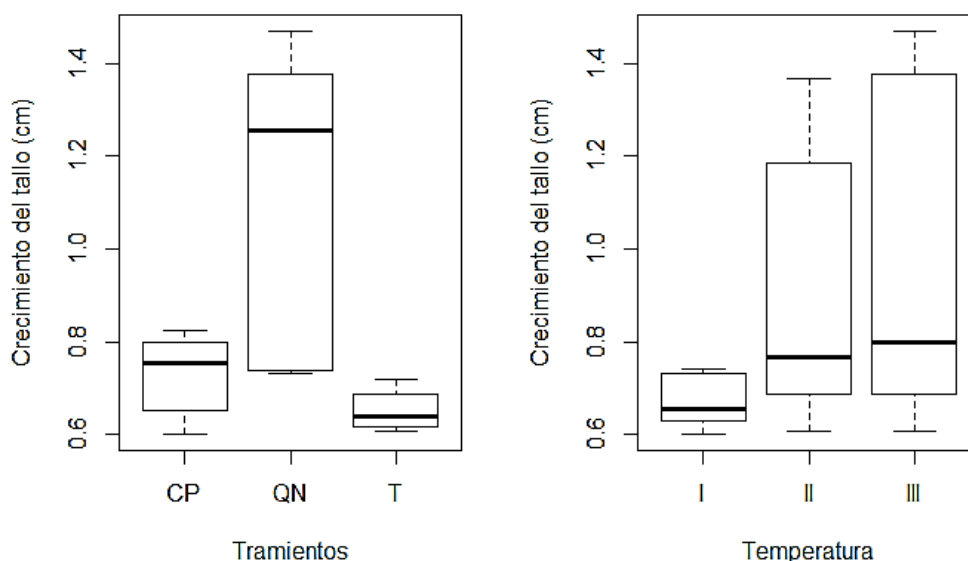
En la (Tabla 47) se define los valores promedio del crecimiento del tallo expresado en cm, con un tiempo de duración de 30 días, constituido de tres tratamientos: ciprés, quinal y un testigo.

**Tabla 47:** Resultado del promedio de la tasa de crecimiento del tallo expresado en cm

Tratamientos	Temperatura								
	200 °C		Promedio	250 °C		Promedio	300 °C		Promedio
Ciprés	0.68	0.64	0.66	0.82	0.77	0.77	0.90	0.93	0.90
	0.65	0.66		0.76	0.74		0.83	0.92	
Quinal	0.73	0.74	0.73	0.84	0.94	0.92	1.00	0.95	1.01
	0.73	0.75		1.00	0.90		1.00	1.10	
Testigo	0.65	0.63	0.65	0.65	0.63	0.65	0.65	0.63	0.65
	0.72	0.61		0.72	0.61		0.61	0.72	

La tasa promedio de crecimiento semanal del tallo con el biochar de quinal elaborado a 300 °C presentó un mayor efecto, donde se adquirió un valor promedio de 1.01 cm, mientras que, con los dos tipos de biochar 200 °C y 250 °C alcanzó el 0.73 cm y 0.92 cm respectivamente. Por otro lado para el biochar de ciprés a 300 °C de temperatura, la tasa promedio de crecimiento semanal del tallo fue de 0.90 cm, mientras que en 200°C fue de 0.66 cm y a 250 °C se consiguió el 0.77 cm. Con respecto al testigo, la tasa de crecimiento alcanzó 0.65 cm, este tratamiento al comparar con los 2 tratamientos de ciprés y quinal demuestra que tiene diferencia significativa, debido a que no aporta los nutrientes necesarios para el crecimiento de la plántula a diferencia del biochar.

La (Figura 90) es un gráfico construido con los datos de la (Tabla 48) que representa el promedio de crecimiento semanal del tallo (en cm) aplicado a 3 tratamientos: ciprés (CP), quinal (QN) y testigo (T) y las temperaturas de producción del biochar: I (200 °C), II (250 °C) y III (300 °C).



**Figura 90:** Tasa de crecimiento semanal del tallo con respecto a los tratamientos y la temperatura de producción del biochar

A continuación se detallan ilustraciones gráficas que hacen referencia al brote de la raíz y tallo aplicado con los 3 tratamientos desde el día cero hasta los 9 días de la germinación de la plántula de trigo, vienen representados por una bandeja de referencia debido a que las 3 bandejas restantes son similares, las medidas que se registraron durante la germinación de la raíz y tallo se muestran en la parte de anexos.

En la (Figura 91) se visualiza el brote de la raíz desde el 0 día hasta el 09 días de la germinación para el tratamiento testigo (T), representado en una sola bandeja, comprendido por las 12 semillas con agua desionizada.



**Figura 91:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento testigo (T)

A continuación la (Figura 92) representa el brote de la raíz y el tallo para el tratamiento: biochar de ciprés torrefactado a 200 °C de temperatura (T1), constituido por 1 bandeja, las 3 bandejas restantes son similares.



**Figura 92:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 200 °C (T1)

La (Figura 93) detalla el brote de la raíz y el tallo para el tratamiento: biochar de ciprés obtenido 250 °C de temperatura (T2), representado por una sola bandeja.



**Figura 93:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 250 °C (T2)

La (Figura 94) muestra 1 bandeja que presenta el brote de la raíz y el tallo para el tratamiento: biochar de ciprés a 300 °C de temperatura (T3).



**Figura 94:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de ciprés a 300 °C (T3)

De igual manera para el tratamiento: biochar de quinual obtenido a 200 °C de temperatura (T4), se muestra a continuación en la (Figura 95) el brote de la raíz y tallo

desde el día cero hasta los 09 días de la germinación de las plántulas de trigo, establecido por 1 bandeja de referencia, las 3 bandejas restantes son similares.



**Figura 95:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinal a 200 °C (T4)

La (Figura 96) muestra el brote de la raíz y el tallo para el tratamiento: biochar de quinal a 250 °C de temperatura (T5).



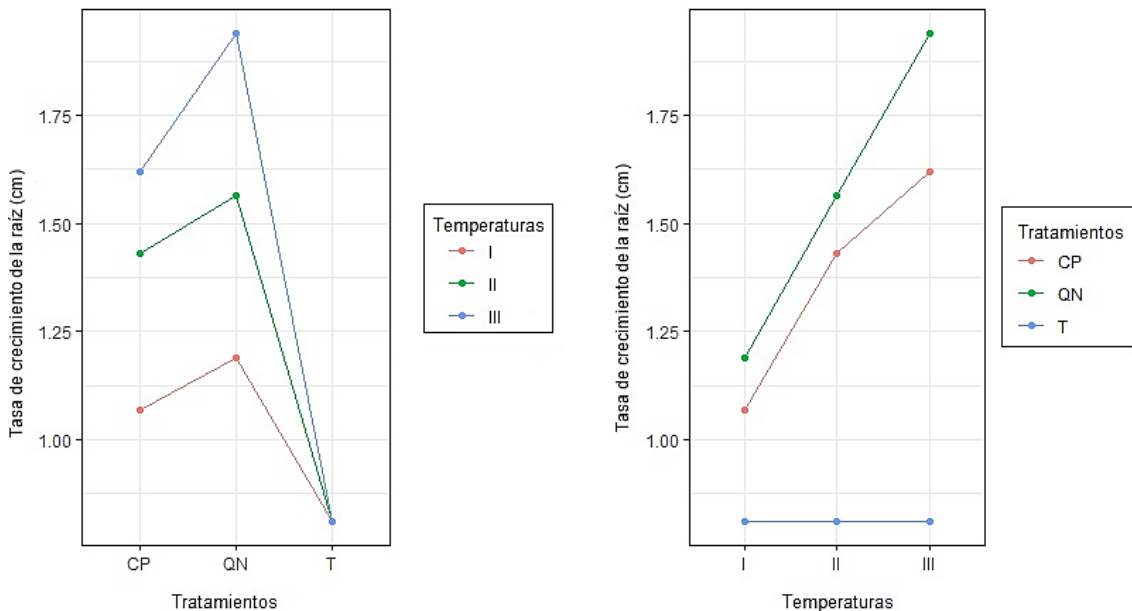
**Figura 96:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinal a 250 °C (T4)

La (Figura 97) constituye el brote de la raíz y el tallo para el tratamiento: biochar de quinal a 300 °C de temperatura (T6).



**Figura 97:** Brote de la raíz y tallo durante la germinación del trigo con el tratamiento biochar de quinual a 300 °C (T4)

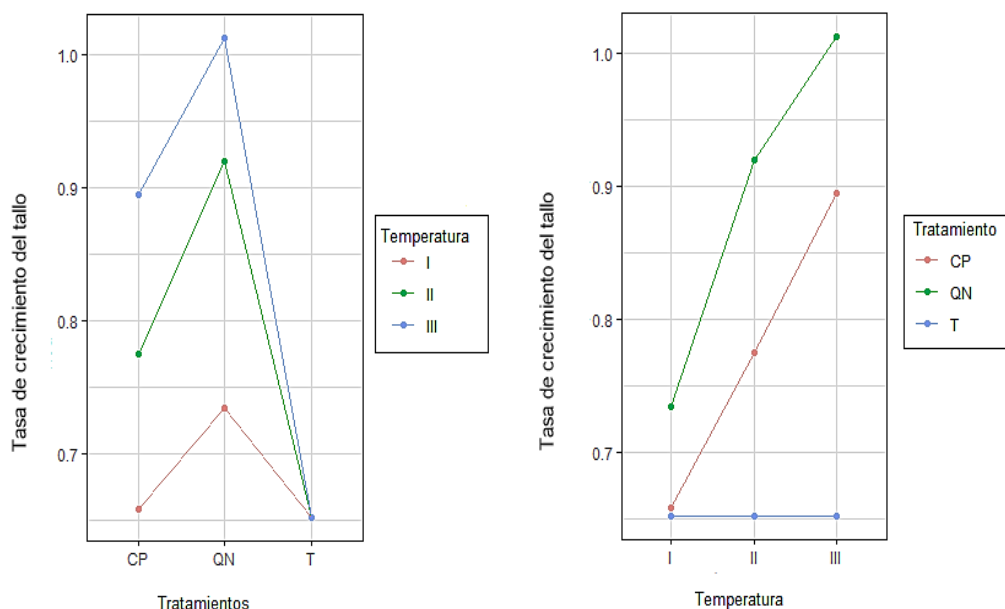
A partir de la representación gráfica de la (figura 98) se detalla la diferencia del efecto en los tratamientos dependiendo de las temperaturas de producción del biochar. Existe mayor efectividad en el tratamiento de biochar de quinual y ciprés a 300 °C. El efecto parece ser mayor en biochar de ciprés y quinual a 300 °C que a temperaturas de 200 °C y 250 °C. El hecho de que las rectas no sean paralelas indica que la interacción es significativa, aunque habrá que confirmar esto estudiando la interacción de los tratamientos.



**Figura 98:** Tasa de crecimiento de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas

La (figura 99) representa la diferencia del efecto en los tratamientos dependiendo de las temperaturas de producción del biochar. Existe mayor efectividad en el tratamiento

de biochar de quinual y ciprés a 300 °C. Si bien la significancia se tendrá que confirmar con el ANOVA. La distribución de las observaciones de cada tratamientos son simétricos, sin la presencia de valores atípicos y homocedásticos, de esta manera se satisfacen los supuestos necesarios para un ANOVA.



**Figura 99:** Tasa de crecimiento de la raíz con respecto a los tratamientos y las temperaturas

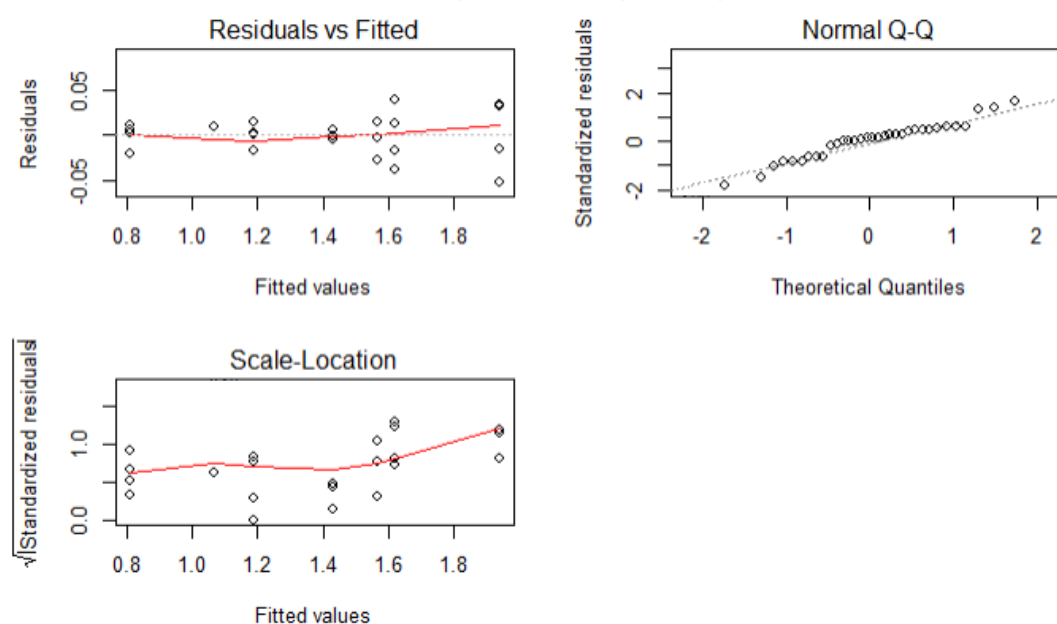
En general se consigue una mayor tasa de crecimiento semanal de la raíz y el tallo con una temperatura alta, independientemente del tipo de tratamiento. Al cambiar de una temperatura baja a una intermedia, la tasa de crecimiento semanal de la raíz y el tallo con el tratamiento de quinual presenta un incremento real, mientras que con los tratamientos de testigo y ciprés disminuye. Con una temperatura de intermedia a alta, la tasa de crecimiento semanal incrementa para los tratamientos de ciprés y quinual y se mantiene en esencia sin cambio para el testigo. El tratamiento de quinual produjo los mejores resultados si se quiere un mayor incremento de la tasa de crecimiento de la raíz cuando la temperatura cambia.

El análisis de varianza ANOVA descrito en la (Tabla 48), se plantearon 2 escenarios que manifiesta el comportamiento de la tasa de crecimiento promedio de la raíz, se estableció la hipótesis nula, donde indica que el promedio de las tasas de crecimiento semanal en 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.

**Tabla 48:** Análisis de varianza con los datos del crecimiento semanal de la raíz

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor P
Tratamientos	3.6703	2	1.83513	2261.07	$< 2.2e^{-16}$
Temperatura	1.1322	2	0.56612	697.52	$< 2.2e^{-16}$
Interacción	0.6149	4	0.15372	189.40	$< 2.2e^{-16}$
Residual	0.0219	27	0.00081		

En la (Tabla 48) muestra el análisis de varianza. Puesto que la prueba de probabilidad F resultó ser de  $f_{0.05,4,27} = 189.40$ , se concluye que hay una interacción significativa entre los tipos de tratamientos y las temperaturas del biochar. Además  $f_{0.05,2,27} = 2261.07$  y  $f_{0.05,2,27} = 697.52$ , por lo que los efectos principales del tipo de tratamiento y la temperatura también 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 datos de la tasa de crecimiento de la raíz expuestos en la (Figura 100).



**Figura 100:** Gráfico del análisis estadístico ANOVA aplicado en la tasa de crecimiento de la raíz

Los resultados muestran varianza y homocedasticidad para los distintos niveles, la gráfica de probabilidad normal (Q-Q Plot) de los 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 contra los valores ajustados, demuestra una ligera tendencia de la varianza de los datos residuales a extenderse, cuando la tasa de crecimiento semanal de la raíz y el tallo se incrementa.

En este experimento, la interacción es significativa. Cuando la interacción es significativa, las comparaciones entra las medias de uno de los factores (por ejemplo A, tratamientos), pueden ser oscurecidas por la interacción AB (tratamientos: temperatura). Una forma de abordar esta cuestión consiste en fijar el factor B (Temperatura), en un nivel específico. El interés se encuentra en detectar la diferencia entre las medias de los tres tipos de tratamiento. Puesto que la interacción es significativa, esta comparación se hace con un solo nivel, para ello se establece la temperatura de 300 °C. Por lo que esto tiene que ser confirmado mediante el análisis de varianza ANOVA para determinar si las diferencias observadas son significativas (Tabla 49).

**Tabla 49:** Análisis de varianza con los datos del crecimiento semanal de la raíz con respecto a la temperatura y los tratamientos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor P
Temperatura (300°C)	2.69542	2	1.34921	1339.6	$7.27e^{-12}$
Residual	0.00906	9	0.00101		

Este análisis indica que con el nivel de temperatura de 300 °C, el promedio de la tasa de crecimiento semanal de la raíz, para los tratamientos de ciprés y testigo no presenta mayor efectividad, mientras que para el tratamiento de quinal la diferencia es significativa. De esta manera se comprueba que el tratamiento de quinal a una temperatura de 300 °C, tuvo mejores resultados como aditivo en la germinación de las plántulas de trigo.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES

Durante la producción del biochar se obtuvo que a 200 °C, el rendimiento másico en biochar de ciprés presentó el 65 % y en quinal fue de 66 %, a temperaturas bajas menores a 200 °C, la biomasa pierde sus propiedades químicas en menor cantidad. Sin embargo a temperaturas altas 300 °C, el rendimiento másico alcanzó entre 43 % y 45 % esto significa que a mayor temperatura la biomasa empieza a perder sus características químicas convirtiéndose una parte en carbón, en compuestos volátiles y una mínima parte de cenizas.

El proceso de torrefacción modifica positivamente la calidad de la biomasa para ser transformada como combustible, ya que incrementa la densidad, el rendimiento en su potencial energético y propicio la homogeneidad de la biomasa.

Los dos residuos madereros de ciprés y quinal presentaron una cantidad similar en las características químicas, las propiedades de los biochar están fuertemente influenciadas por la temperatura de producción, lo cual hace posible preparar biochars con diferentes propiedades físico químicas.

La caracterización química de la biomasa residual entre las 2 especies (quinal y ciprés), es posible torrefactar a temperaturas altas (mayor a 250 °C), ya que los porcentajes de hidrógeno se redujeron en rangos desde el 6 % al 3 % en biochar de ciprés. En cuanto a la variable oxígeno se redujo al 0.003 % y azufre desde el 0.99 % al 0.15 %. De igual manera en biochar de quinal el contenido de hidrógeno disminuyó desde el 5 % al 3 %, el oxígeno al 0.0069 % y el porcentaje de azufre entre el 0.18 y 0.11 %

La caracterización obtenida de los análisis realizados en biochar de ciprés y quinal producido a 3 temperaturas de reacción (200 °C, 250 °C y 300°C), indican disminución de materia volátil. En biochar de ciprés disminuyó desde el 85 % hasta el 26 %, mientras que en biochar de quinal se redujo el porcentaje promedio a partir del 83.14 % hasta el 21.33 %, lo que implica menos gases hacia la atmósfera. Por otro lado la humedad de la biomasa en ciprés y quinal se sometió a un post secado porque se encontró valores altos entre el 56 % y 57 % respectivamente, al corregir estos valores se alcanzó a un porcentaje promedio óptimo entre el 8 % y 9 % para los 6 tipos de biochar.

En base a los resultados del análisis último se calculó la relación C/H de la biomasa dando como resultado un aumento en la relación durante el proceso de carbonización

durante la torrefacción, el cual mejora el potencial energético de los productos sólidos, en este estudio, se obtuvo mejores resultados energéticos obtenidos con temperaturas de reacción altas (300 °C) y se atribuyen a los productos sólidos evaluados por medio del contenido de poder calórico, los cuales se ha demostrado que, el biochar producido a partir de ciprés y quinal a 300 °C de temperatura, se comprobó aumentos en su potencial energético, por lo que son los mejores a ser aprovechados como combustible.

El biochar de ciprés y quinal, presentaron una alta relación C/N que estimuló el desarrollo de las plantas.

La adición de biochar procedente de la torrefacción generó efectos positivos en la germinación de Trigo (*Triticum vulgare*), por lo que se demostró mayor eficiencia en el desarrollo radicular de las plantas. En este estudio, se encontró mayor efectividad en el desarrollo de la raíz y tallo con la aplicación del biochar a partir de quinal obtenido a 300 °C de temperaturas.

La tasa de crecimiento de la raíz alcanzó un promedio de 1.80 cm con biochar de quinal, siendo este tratamiento superior con respecto a los 2 restantes tratamientos conformados por biochar de ciprés y el testigo. Así mismo la tasa de crecimiento del tallo fue de 1.01 cm. Con ello se demostró que al usar biochar como medio para germinación, las semillas de trigo, germinaron con porcentajes aceptables mayor al 60 %, sin afectarse por el tiempo y la humedad.

## **CAPITULO VI**

### **6. RECOMENDACIONES**

Aprovechar las propiedades que nos brinda el biochar, generando más aplicaciones del mismo en investigaciones futuras. Se debe continuar con la mejora del conocimiento sobre los efectos que pueden producir los diferentes tipos de biochar obtenidos, por procesos diferentes de pirólisis, sobre la dinámica de agregación del suelo.

Es necesario realizar investigaciones para ampliar el análisis del contenido de otros nutrientes del biochar no realizados en la presente investigación como: fósforo y potasio.

Se recomienda realizar un estudio técnico y cálculo de emisiones de gases producidos durante el proceso de torrefacción.

Aprovechar los co-productos del proceso de torrefacción es necesario implementar una salida de compuestos volátiles que se convierten en energía potencial, a futuro esta energía puede ser utilizada en cocinas mejoradas o en sistemas de calefacción o infraestructuras que permitan disminuir el consumo de otros combustibles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenza, D. P. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta (Tesis de grado)*. Universidad Autónoma de Barcelona, Madrid - España.
- Acelas, N., Ruiz, W., & López, D. (2010). Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino ciprés. *Artigo*, 33(7), 1500–1505.
- Alarcón, K. (2009). *Existencias de necromasa en bosques vírgenes y manejados de Lengua (Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl.) Krasser) en la XII región (Tesis de grado)*. Universidad de Chile.
- Alba Reyes, Y., Pérez Gil, M., Ley Chong, N., & Arteaga Pérez, L. E. (2018). Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos. *Tecnología Química*, 38(1), 123–137.
- Aranda Trujillo, E. (2017). *Producción y caracterización de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas (Tesis de grado)*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima - Perú.
- Araujo Murakami, A., Parada, A., Terán, J., Baker, T., Feldpausch, T., Philips, O., & Brienen, R. (2011). Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. *Revista Peruana de Biología*, 18(1), 113–118.
- 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*, (33), 2–6.
- Armendáriz, J. (2014). Energía de la biomasa. *Centro Nacional de Energías Renovables (CENER)*, 46(1), 35–36.
- Baray, M. (2016). *Pirólisis a baja temperatura de la pomasa de manzana para la producción de biocombustibles (Tesis de grado)*. Centro de investigación en materiales avanzados departamento de estudios de posgrado, Chihuahua.
- Bermeo, L. (2018). *Obtención de biocarbón mediante torrefacción seca a partir de residuos de Balsa (Ochroma pyramidale) (Tesis de grado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.
- Borja, M. (2011). La biomasa residual de las plantaciones agrícolas como energía renovable. *Agrónomos*, 41(12), 18–27.
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5–24.
- Carmona, R. (2015). *Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa*

- como materia prima biocombustible (Tesis Doctoral). Universidad de Córdoba.
- Castro, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del pino patula en atmósfera de dióxido de carbono (Tesis de grado)*. Universidad libre de Colombia, Bogotá.
- 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 (Tesis Doctoral)*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Madrid.
- Cutimbo, M. (2017). *Estudio exploratorio del proceso de co-combustión de carbón y biomasa mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en la generación de calor (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Demirbas, K. (2019). Agricultural Biomass Potential in Turkey. *International Journal of Management and Applied Science*, 3(2), 1–4.
- Díaz, C. (2017). *Uso de biochar de acícula de pino (Pinus patula) como enmienda de suelo negro andino (Tesis de grado)*. Universidad del Azuay, Cuenca-Ecuador.
- Edenhofer, O., Pichs, R., & Sokona, Y. (2016). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Cambio climático (cuarta)*. Alemania.
- 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*, 34(3), 367–382.
- Galarza, F. (2018). Turismo y Cultura. *Cañar*, 12(2), 1–28.
- García, S. M., & Moreta, D. M. (2019). *Identificación y control de plagas y enfermedades en Polylepis racemosa en la zona de Toacazo, Tanicuchi y Pastocalle (Tesis de grado)*. Universidad Politécnica Salesiana SEDE Quito, Ecuador.
- Garzón, G. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis de material lignoceluloso proveniente del eucalipto en atmósfera de dióxido de carbono*. *instname:Universidad Libre*. Retrieved from <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11026>
- Gilces Reyna, M. A. (2014). *Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. Tesis*. Universidad de Valladolid, Palencia-España.
- Goche, J., Domínguez, P., Montiel, E., & Palacios, C. (2015). *Conceptualización y caracterización de los pellets madereros en el marco del desarrollo sustentable (Primera, Vol. 42)*. Monterrey, México.
- Gómez, L., Cruz, A., Jiménez, D., & Ocampo, Á. (2016). Biochar como enmienda de un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Actualidad y Divulgación Científica*

- U.D.C.A, 19(2), 341–349.
- Gualavisí Quimbiamba, L. (2008). *Comportamiento de Polylepis racemosa en vivero mediante propagación vegetativa utilizando cuatro longitudes de estacas en platabandas a nivel en tres diferentes pisos altitudinales*. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, Ecuador.
- 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, Lima-Perú.
- Herdía Salgado, M., & Tarelho, L. (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(2), 6–11.
- Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, P. (2012). Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. *Transferencia de Conocimientos Sobre El Aprovechamiento Energético de La Biomasa (TRASBIOMA)*, 13(2), 105–109.
- Herrera, J. (2018). *Pirólisis de biomasa para la obtención de biocarbón y su efecto en el rendimiento del tomate (Tesis de grado)*. Universidad Rafael Landívar, Coatepeque.
- Iglesias, S. (2018). *Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro Ecuatoriano (Tesis de grado)*. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima-Perú.
- INEN. (2010). *Fascículo provincial del Cañar*.
- Lara, N., Figueroa, L., Carvajal, F., Zapata, Y., Urbina, C., & Escobar, H. (2013). Diferenciación cuantitativa entre el carbono orgánico del suelo y el carbono del biochar en suelos áridos. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 40(2), 387–395.
- López Merchán, R. M. (2017). *Valoración de carbono en la necromasa y suelo del bosque protector aguarongo, provincia del Azuay (Tesis de grado)*. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador.
- Ludeña, B., & Vázquez, H. (2017). *Estudio de las posibilidades de uso de residuos forestales de la granja Irquis para la generación de energía eléctrica (Tesis de grado)*. Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Martínez, A., & Bohórquez, L. (2017). *Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lena de bagazo de caña, como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa (Tesis de grado)*. Universidad de la salle, Bogotá-Colombia.
- Martínez, C. (2015). *Efectos de enmiendas de biochar sobre el desarrollo en Cucumis sativus L. Var.SMR-58(Tesis de grado)*. Universidad de Guadalajara, México.

- Matilla, J. (2008). Desarrollo y germinación de las semillas. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 12(2), 537–558.
- McHenry, M. P. (2009). Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129(1–3), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.006>
- Mclaughlin, H., Anderson, P., & Shields, F. (2009). All Biochars are Not Created Equal , and How to Tell Them Apart. *Biochar*, 2(12), 1–37.
- Méndez, A. (2017). *Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje (Tesis de Máster oficial en Ingeniería Ambiental)*. Universidad de Valladolid, España.
- Merino, M. (2015). *Evaluación de una técnica de propagación asexual con esquejes apicales del ciprés (Cupressus macrocarpa) Var. Gold crest (Tesis de grado)*. Universidad Técnica de Ambato, Cevallos-Ecuador.
- Minga, D., & Verdugo, A. (2016). *Árboles y arbustos de los ríos de Cuenca. Serie textos apoyo a la docencia Universitaria del Azuay*. Imprenta Don Bosco. Cuenca.
- Mistretta, G., Zamora, G., Peralta, F., Gutiérrez, C., Bravo, V., Zalazar, H., ... Cárdenas, G. (2011). Metodologías termogravimétricas para la determinación del contenido de cenizas en bagazo y en residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar en Tucumán. *Proyectos Agroindustriales*, 45(2), 1–8.
- Moreno, I., Ramírez, A., Plana, R., & Iglesias, L. (2001). El cultivo del trigo, resultados de su producción en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 22(4), 55–67.
- Müller, N., Tessini, C., Segura, C., Berg, A., & Grandón, H. (2013). Pirólisis rápida de biomasa. *Unidad de Desarrollo Tecnológico*, (12), 1–15.
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals , Technologies , and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy Fuels*, 17(2), 1510–1521.
- Olmo, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo , las características de la raíz y la producción vegetal (Tesis doctoral)*. Universidad de Córdoba.
- Oses Orbegozo, A. (2013). *Efectos de la aplicación de biochar en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas (Tesis de grado en ciencias ambientales)*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Pantoja, J. (2015). *Participación en el diseño de un horno de pirólisis piloto de residuos agroindustriales con funcionamiento por etapas para producir biochar (Tesis de grado)*. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.
- Patiño Martínez, P. E. (2014). Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*, 2(1), 45–52.

- Reyes, G. (2018). *Aprovechamiento de residuos forestales en forma de biocarbón como alternativa agroecológica para la producción de madera de calidad de Acacia Mangium willd (Tesis de grado)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Romo, N., Toro, F., Flores, L., & Cañas, A. (2011). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 1–15.
- Rosero, C. (2014). *Evaluación de 2 fertilizantes de lenta liberación en la propagación asexual del yagual (Polylepis racemosa) en la comunidad San José del Guanto, Cantón Quero, Tungurahua (Tesis de grado)*. Univesidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Tauro, R. J. (2013). *Factibilidad técnica-económica de la producción de pellets con residuos de la industria forestal del estado de Veracruz (Tesis de grado)*. Universidad Veracruzana, Veracruz.
- Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa (Tesis de grado)*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384–401.
- Uceda, M. (2015). Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la amazonía Peruana. *Revista Forestal Del Perú*, 12(1–2), 1–15.
- Urien, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual (Tesis de Máster)*. Universidad Nacional de Educación a distancia, Facultad de Ciencias, España.

## ANEXOS

**Anexo 1:** Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar de quinal obtenido a 200 °C de temperatura expresado en cm

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T1M2	T2	1	1	1.5	1.5	1.3
			2	1.5	1	1.5	1
			3	1.3	1.7	1	1.8
			4	1	1.5	1.3	1.4
			5	1.4	1.5	1	1.4
			6	1.5	1	1.7	1.2
			7	1.8	1.1	1	1.5
			8	1	1.4	1.5	1.1
			9	1.3	1.5	1.7	1.4
			10	1	1.7	1	1
			11	1.7	1	1.5	1
			12	1.5	1.6	1	1.4
2	T1M2	T2	1	2.6	3	3	3
			2	3.2	2.6	2.7	2.7
			3	2.6	3	2.4	3
			4	2.3	3	2.5	3
			5	3	2.6	2.7	2.7
			6	3.2	2.5	3	3
			7	3	2.6	2.5	2.7
			8	2.6	3.2	3	2.6
			9	3	3.3	3.2	2.7
			10	2.5	3	2.8	2.8
			11	3.4	2.5	3.2	2.7
			12	3	3	2.8	3
3	T1M2	T2	1	4.2	4.6	4.4	4.5
			2	4.6	4.5	4.5	4.4
			3	4.5	4.7	4.2	4.6
			4	4	4.6	4	4.6
			5	4.7	4.5	4.3	4.2
			6	4.5	4	4.6	4.4
			7	4.6	4.2	4.2	4.3
			8	4.2	4.6	4.6	4.2
			9	4.7	4.8	4.7	4.2
			10	4.2	4.7	4.2	4.3
			11	4.8	4	4.6	4.3
			12	4.5	4.7	4.3	4.6
4	T1M2	T2	1	5.5	6	5.8	5.6
			2	6	5.6	6	5.5
			3	5.8	6	5.6	5.6
			4	5.4	6	5.5	6
			5	5.9	5.7	5.5	5.3
			6	5.7	5.6	6	6
			7	6	5.4	5.5	5.5
			8	5.5	5.6	5.6	6
			9	6	5.8	6	5.5

**Anexo 2:** Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar a partir de ciprés obtenido a 250 °C de temperatura expresado en cm

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T2M1	T3	1	2.0	2.5	2.0	2.0
			2	2.3	2.0	2.5	2.3
			3	2.0	2.3	2.0	2.0
			4	2.2	2.7	2.2	2.2
			5	2.1	2.0	2.0	2.6
			6	2.4	2.0	2.7	2.5
			7	2.3	2.5	2.5	2.0
			8	2.0	2.1	2.2	2.3
			9	2.3	2.0	2.5	2.0
			10	2.3	2.5	2.3	2.0
			11	2.0	2.3	2.0	2.5
			12	2.4	2.0	2.1	2.5
2	T2M1	T3	1	4.5	4.5	4.6	4.0
			2	4.7	4.3	4.5	4.7
			3	4.8	4.6	4.5	4.8
			4	4.6	4.5	4.7	4.6
			5	4.2	4.5	4.8	4.8
			6	4.0	4.3	4.5	5.0
			7	4.2	4.6	5.2	4.7
			8	4.0	4.7	4.6	4.7
			9	4.7	4.0	4.3	4.0
			10	4.6	5.0	4.5	4.2
			11	4.0	4.6	4.0	4.6
			12	4.5	4.0	4.5	4.7
3	T2M1	T3	1	7.0	6.8	7.2	6.8
			2	6.8	6.7	6.8	7.2
			3	7.0	6.8	7.0	7.0
			4	6.8	7.2	6.6	7.0
			5	6.8	6.8	7.2	7.2
			6	6.5	6.6	6.7	7.4
			7	6.8	6.8	7.2	6.7
			8	6.8	7.2	7.0	6.8
			9	7.0	6.7	7.2	6.7
			10	6.8	7.0	6.5	6.8
			11	6.8	7.0	6.6	7.2
			12	7.0	6.5	7.0	6.8
4	T2M1	T3	1	9.3	8.8	9.4	9.3
			2	9.5	9.0	9.2	9.4
			3	9.0	9.3	9.3	9.0
			4	8.9	9.4	8.7	9.1
			5	9.2	9.3	9.5	9.4
			6	8.7	9.0	9.0	9.6
			7	9.4	9.2	9.5	9.2
			8	9.3	9.4	9.4	9.0
			9	9.2	9.0	9.3	9.3
			10	9.3	9.3	8.7	9.2
			11	9.0	9.4	9.0	9.4
			12	9.5	8.7	9.3	9.2

**Anexo 3:** Datos del crecimiento semanal de la raíz en cm con el tratamiento: biochar de quinual obtenido a 250 °C de temperatura

Fecha	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T2M2	T4	1	1	1.5	1	1.3
			2	1.5	1	1	1
			3	1.5	1.4	1.3	1.5
			4	1	1	1	1
			5	1.5	1.5	1.4	1.5
			6	1	1.2	1.5	1
			7	1.7	1.5	1.5	1.3
			8	1.5	1.4	1	1.2
			9	1.4	1.3	1.5	1.5
			10	1	1.2	1	1.1
			11	1.5	1	1.6	1.7
			12	1	1.4	1.25	1
2	T2M2	T4	1	2.5	3.3	2.5	3
			2	2.5	2	2.5	2.4
			3	3.2	2.7	2.7	3
			4	3	2.5	2.8	2.5
			5	2.8	2.5	2.7	2.8
			6	2.6	3	3	2.6
			7	3.5	3.2	2.8	2.8
			8	2.7	3.2	2.7	2.6
			9	3.2	2.7	3.2	3
			10	2.6	3	2.6	2.8
			11	3	2.5	3	3
			12	2.6	3.2	2.8	2.6
3	T2M2	T4	1	4.6	4.6	4.2	4.5
			2	4.4	4.4	4.8	4.2
			3	4.3	4.2	4.2	4.5
			4	4.6	4.3	4.6	4.2
			5	4.8	4.4	4.6	4.4
			6	4.2	4.5	4.4	4.2
			7	4.6	4.6	4.2	4.6
			8	4.6	4.8	4.5	4.2
			9	4.6	4.6	4.6	4.6
			10	4.6	4.6	4.4	4.6
			11	4.2	4.4	4.5	4.3
			12	4.7	4.5	4.2	4.4
4	T2M2	T4	1	6	6.2	5.3	6
			2	5.6	5.7	6.2	5.5
			3	5.5	5.4	5.6	5.7
			4	5.6	6	6	5.5
			5	6.2	5.8	6.2	6
			6	5.6	5.8	5.7	5.7
			7	5.8	6.2	5.8	6
			8	6	6	6	5.8
			9	6.2	6	6.2	6
			10	5.6	5.9	5.6	5.8
			11	5.5	5.8	5.8	6
			12	6.3	6.2	5.6	5.7

**Anexo 4:** Datos del crecimiento semanal de la raíz en cm con el tratamiento de biochar a partir de ciprés obtenido a 300 °C de temperatura

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T3M1	T5	1	1.3	1.2	1	1
			2	1.5	1.5	1.2	1.3
			3	1	1	1.2	1.5
			4	1.12	1	1	1
			5	1.2	1	1.4	1.5
			6	1.3	1.5	1.5	1
			7	1	1.3	1	1.5
			8	1.2	1.2	1.2	1.6
			9	1.4	1.5	1.3	1.2
			10	1.3	1.4	1.4	1
			11	1	1.7	1	1
			12	1.6	1.2	2	1.5
2	T3M1	T5	1	2.8	2.8	2.6	2.7
			2	3.1	2.8	2.5	3
			3	2.5	2.7	2.6	3.2
			4	2.7	2.6	2.5	2.6
			5	2.8	2.6	2.7	2.6
			6	3	3	3.3	2.5
			7	2.6	2.7	2.6	2.5
			8	2.8	3.1	3	2.7
			9	3	3	2.7	3
			10	2.7	2.6	3	2.6
			11	2.7	3.1	2.5	2.7
			12	3	2.8	3.3	3
3	T3M1	T5	1	4.2	4.3	4.4	4.3
			2	4.3	4.2	4.3	4.6
			3	4.2	4.2	4.2	4.6
			4	4.6	4	4.3	4.3
			5	4.3	4.2	4.3	4.2
			6	4.6	4.6	4.6	4.3
			7	4.2	4.5	4.3	4.2
			8	4.6	4.6	4.5	4.4
			9	4.5	4.6	4.5	4.5
			10	4.2	4.2	4.2	4.2
			11	4.3	4.5	4	4.2
			12	4.2	4.6	4.6	4.6
4	T3M1	T5	1	5.5	5.5	5.7	5.7
			2	5.7	5.7	5.5	5.8
			3	5.6	5.6	5.7	6
			4	6	5.3	5.5	5.5
			5	5.6	5.5	5.7	5.5
			6	6	6	6	5.8
			7	5.7	5.6	5.7	5.5
			8	6	6	5.8	5.8
			9	5.7	6	5.8	5.7
			10	5.5	5.7	5.6	5.6
			11	5.7	6	5.6	5.7
			12	5.6	6	5.8	6

**Anexo 5:** Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento: biochar de quinal obtenido a 300 °C de temperatura expresado en cm

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	T3M2	T6	1	2.5	2	2.4	2.1
			2	2	2.1	2.4	2.4
			3	2.4	2.5	2.5	2
			4	2.5	2.6	2	2.5
			5	2.7	2.6	2.4	2.3
			6	2	2.6	2.6	2.6
			7	2.4	2.7	2.2	2.7
			8	2	2.7	2.8	2.7
			9	2.4	2	2.3	2.4
			10	2	2.4	2	2.1
			11	2.5	2.4	2.5	2
			12	2.5	2	2	2.5
2	T3M2	T6	1	4.7	4.8	5	4.5
			2	4.2	4.6	4.5	5
			3	4.3	4.7	5	4.5
			4	5	4.8	4.5	4.6
			5	4.8	5	4.3	4.8
			6	4.4	4.6	4.5	5
			7	5	4.7	4.6	4.8
			8	4.6	4.6	4.2	5
			9	5	4.7	4.3	4.5
			10	4.3	5	4.2	4.3
			11	4.6	4.7	5	4.3
			12	4.8	4.6	4	4.6
3	T3M2	T6	1	7	6.8	7.2	6.8
			2	6.8	6.8	6.5	7.2
			3	6.5	6.6	6.7	7
			4	6.8	6.8	6.5	6.8
			5	6.8	7.2	7.2	7.2
			6	7	6.7	6.4	6.7
			7	6.8	6.8	6.8	6.8
			8	6.8	7	7	6.8
			9	6.8	6.7	7.2	6.7
			10	6.5	6.8	6.6	6.8
			11	6.8	6.8	7	7.2
			12	6.8	7	6.4	6.8
4	T3M2	T6	1	9.2	9.4	9.4	9.3
			2	9.5	9.3	9.6	9.4
			3	9	9	9.3	9
			4	9.5	9.4	9.6	9.5
			5	9.2	9.3	9.5	9.4
			6	9	9	9	9.6
			7	9.4	9.3	9.5	9.5
			8	9.3	9.2	9.6	9
			9	9.2	9.4	9.5	9.3
			10	9.3	9.3	9.4	9.6
			11	9	9.4	9.3	9.4
			12	9.3	9.5	9.3	9.2

**Anexo 6:** Datos del crecimiento semanal de la raíz con el tratamiento de testigo expresado en cm

Semana	Tratamiento	Simbología	# De semillas	Repeticiones			
				I	II	III	IV
1	Testigo	T7	1	1	1	1.5	1.4
			2	1.5	1.5	1	1.5
			3	1	1.3	1	1
			4	1	1.5	1.5	1
			5	1.6	1.2	1.2	1.1
			6	1	1.2	1.5	1.5
			7	1.1	1.3	1	1
			8	1.6	1	1.6	1
			9	1	1	1.4	1.4
			10	1.1	1.2	1	1
			11	1.4	1.4	1	1
			12	1	1.4	1	1.4
2	Testigo	T7	1	1.7	1.8	2	2
			2	1.8	1.6	1.7	1.8
			3	1.6	1.8	1.7	1.6
			4	1.7	2	2	1.6
			5	2	1.8	1.6	1.7
			6	1.8	1.6	1.7	1.6
			7	1.6	1.8	1.5	1.8
			8	1.8	1.7	1.8	1.7
			9	1.6	1.8	2	1.8
			10	1.8	1.7	1.7	1.6
			11	1.5	1.6	1.6	1.7
			12	1.6	1.8	1.6	1.5
3	Testigo	T7	1	2.6	2.8	2.8	2.7
			2	2.5	2.8	2.6	2.6
			3	2.7	2.7	2.7	2.5
			4	2.6	2.7	2.6	2.7
			5	2.6	2.5	2.8	2.6
			6	2.8	2.8	2.7	2.7
			7	2.5	2.6	2.6	2.6
			8	2.5	2.8	2.8	2.6
			9	2.6	2.5	2.6	2.5
			10	2.8	2.8	2.8	2.6
			11	2.4	2.4	2.3	2.5
			12	2.4	2.3	2.4	2.6
4	Testigo	T7	1	3	3.5	3.4	3.1
			2	3.1	3.2	3.2	3
			3	3.3	3.4	3.4	3.2
			4	3.2	3.5	3.4	3.4
			5	3.4	3.4	3	3.2
			6	3	3.2	3.4	3.4
			7	3.2	3.3	3.2	3.5
			8	3.4	3.4	3.4	3.2
			9	3	3.1	3.4	3
			10	3.5	3.3	3.2	3.4
			11	3.3	3.2	3.4	3.3
			12	3.4	3.4	3.2	3.4

**Anexo 7:** Promedio del crecimiento semanal del tallo con los respectivos tratamientos: biochar de ciprés (CP), quinal (QN) y testigo (T) y las 3 temperaturas de producción: 200 °C (I), 250 °C (II) y 300 °C (III)

<b>Tratamiento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Repetición</b>	<b>Altura (cm)</b>
T	I	I	0.65
T	I	II	0.63
T	I	III	0.72
T	I	IV	0.61
T	II	I	0.65
T	II	II	0.63
T	II	III	0.72
T	II	IV	0.61
T	III	I	0.65
T	III	II	0.63
T	III	III	0.72
T	III	IV	0.61
CP	I	I	0.68
CP	I	II	0.64
CP	I	III	0.65
CP	I	IV	0.66
CP	II	I	0.82
CP	II	II	0.77
CP	II	III	0.74
CP	II	IV	0.76
CP	III	I	0.90
CP	III	II	0.93
CP	III	III	0.83
CP	III	IV	0.92
QN	I	I	0.73
QN	I	II	0.73
QN	I	III	0.73
QN	I	IV	0.74
QN	II	I	0.84
QN	II	II	0.94
QN	II	III	1.00
QN	II	IV	0.90
QN	III	I	1.00
QN	III	II	0.95
QN	III	III	1.00
QN	III	IV	1.10

## PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Tannya Fernanda Ganzhi Maurizaca** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0302546619. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Caracterización química de biochar producido a diferentes temperaturas a partir de los residuos de ciprés y quinal en el cantón Cañar**” 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 se 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, 15 de Junio del 2020



F: \_\_\_\_\_

Tannya Fernanda Ganzhi Maurizaca  
C.I. 0302546619