



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

Biochar de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth: efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en la pirólisis lenta

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

AUTOR: LUIS HUMBERTO PUMA VAQUE

TUTOR: Dr. JAIME MARTÍ

COTUTORA: Dra. YANET VILLASANA

Napo – Ecuador

2023

**DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y
RESPONSABILIDAD**

Tena, 7 de junio de 2023

Yo, Luis Humberto Puma Vaque con documento de identidad 030267441-1, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título de Ingeniero en Biotecnología son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,



Luis Humberto Puma Vaque

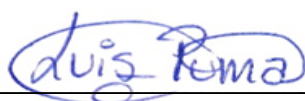
C.I.: 0302674411

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Luis Humberto Puma Vaque, con documento de identidad N° 0302674411, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: "Biochar de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth: efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en la pirólisis lenta" de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam 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 Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 7 de junio de 2023



Luis Humberto Puma Vaque

C.I.: 0302674411

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

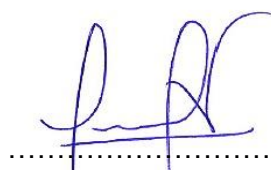
Certifico que el trabajo de titulación: “Biochar de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth: efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en la pirólisis lenta” en la modalidad de: Tesis, fue realizado por Luis Humberto Puma Vaque, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 7 de junio de 2023



Jaime Emilio Martí Herrero
C.I: 1757205651



Yanet Tibaire Villasana Aguilera
C.I: 1757250046

DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado a Dios, mis
padres Luis y Jessica, y toda mi familia
y amigos por cada favor recibido.*

*En especial, a cada persona que de una
u otra forma puso su granito de arena
para que pueda culminar esta etapa
maravillosa llamada Universidad.*

Luis Humberto Puma Vaque

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la salud y la fortaleza para continuar forjando este camino llamado vida.

Agradezco a mis padres Luis y Jessica, no sólo por ser mi soporte económico, sino porque sus consejos, enseñanzas y apoyo moral han forjado el gran ser humano que soy.

Agradezco a mis hermanos Jennifer, Jhon, Anthony y Emily por complementar y alegrar mi vida.

Agradezco a mis amigos que forje en esta Universidad. A Yulissa, Pablo, Daniel, Dayana, Gabriela, Viviana, Mishell, Samantha y si falta un nombre me disculpan. Cada uno ha marcado significativamente mi vida. En especial, a Yulissa a quién considero una hermana de la vida por ser la primera persona que conocí en la Universidad y con quién hemos compartido muchas anécdotas y experiencias; a Mishell por ser la persona que me apoyo moralmente durante esta etapa de titulación; y a Snaider, mi mejor amigo desde mi formación secundaria, por esas charlas incansables y esos buenos deseos de superación personal.

Agradezco a la familia Paspuel-Herrera por abrir las puertas de su hogar en mi estadía universitaria en la ciudad de Tena, especialmente a la Sra. Nilda Herrera por su gran sentido de solidaridad, generosidad y amabilidad para conmigo.

Agradezco al proyecto CIMNE-Ikiam por financiar el desarrollo de esta tesis, y a PhD. Carlos Navas (Yachay) y PhD. Diana Endara Dranichnikova (Escuela Politécnica Nacional) por su apoyo y colaboración en la caracterización del material obtenido en este trabajo. Asimismo, a la técnica del laboratorio de Biomasa Lizbeth Andi por su conocimiento, guía y acompañamiento, y sobre todo su confianza en mí, lo cual permitió pueda culminar con éxito mis actividades de investigación.

De manera especial, agradezco a mis tutores Jaime Martí y Yanet Villasana por su paciencia y su buena disposición a la hora de dirigir este trabajo de titulación. Sin ellos, este trabajo no hubiera sido posible.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a la Universidad Regional Amazónica Ikiam por ser mi casa de estudios y el lugar de muchas anécdotas, aprendizajes y buenas experiencias. En este lugar conocí, compartí y aprendí de grandes mentores (Caroline Bacquet, Rafael de Almeida, Liliana Pila, Yanet Villasana, Pablo Cisneros, Karel Diéguez y más), compañeros y amigos.

A todos ustedes,
Gracias

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Biomasa: definición y características generales	1
1.1.1.1 Definición de biomasa.....	1
1.1.1.2 Formación de la biomasa.....	1
1.1.1.3 Clasificación de la biomasa.....	2
1.1.1.4 Composición de la biomasa	3
1.1.1.5 Conversión e Importancia de la biomasa	4
1.1.2 El Bambú: un recurso de biomasa importante a nivel mundial y en Ecuador.....	6
1.1.2.1 El bambú a nivel mundial	6
1.1.2.2 El bambú en Ecuador	8
1.1.2.3 Información taxonómica, morfológica e importancia de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	9
1.1.3 El Biochar: un biomaterial inspirado en la biomasa	12
1.1.3.1 Definición y características del biochar	12
1.1.3.2 Origen del biochar.....	12
1.1.3.3 Métodos de producción del biochar	13
1.1.3.4 Usos del biochar	13
1.1.4 Pirólisis, el método conocido para producir biochar	14
1.1.5 <i>G. angustifolia</i> , una alternativa para elaboración de biochar.....	15

1.2 Planteamiento del problema	16
1.3 Justificación de la investigación	17
1.4 Objetivos de la investigación.....	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO	19
2.1 Recolección de muestras de <i>Guadua angustifolia</i>	19
2.2 Estudio del secado natural de <i>Guadua angustifolia</i>	19
2.2.1 Pretratamiento de las muestras	19
2.2.2 Análisis de sólidos totales y humedad	22
2.2.3 Análisis de sólidos volátiles	23
2.3 Caracterización de biomasa residual de <i>Guadua angustifolia</i>	24
2.3.1 Pretratamiento de las muestras	24
2.3.2 Contenido de humedad	25
2.3.3 Contenido de materia volátil	25
2.3.4 Contenido de cenizas	26
2.3.5 Contenido de Carbono fijo	27
2.4 Ensayos de producción de biochar de residuos de <i>Guadua angustifolia</i>	27
2.4.1 Preparación de materiales y muestras	27
2.4.2 Ensayos de producción de biochar	27
2.5 Caracterización fisicoquímica del biochar de <i>Guadua angustifolia</i>	28
2.5.1 Análisis de morfología de biochar	29
2.5.2 Análisis químico de biochar	29
2.5.3 Análisis BET (Área superficial específica)	29
2.5.4 Química de grupos funcionales	30
2.5.5 Análisis del pH y conductividad eléctrica	30
2.6 Análisis estadístico	30
CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS	31
3.1 Secado natural de <i>Guadua angustifolia</i>	31
3.2 Caracterización de biomasa residual de <i>Guadua angustifolia</i>	33
3.3 Producción de biochar de residuos de <i>Guadua angustifolia</i>	34
3.4 Caracterización fisicoquímica del biochar de residuos de <i>Guadua angustifolia</i>	35
3.4.1 Análisis morfológico de biochar de <i>G. angustifolia</i>	35
3.4.2 Análisis químico elemental de biochar de <i>G. angustifolia</i>	39

3.4.3 Análisis BET en biochar de <i>G. angustifolia</i>	42
3.4.4 Análisis de grupos funcionales en biochar de <i>G. angustifolia</i>	42
3.4.5 pH y conductividad de biochar de <i>G. angustifolia</i>	43
CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN, Y DISCUSIÓN	46
4.1 Secado natural de <i>Guadua angustifolia</i>	46
4.2 Caracterización de biomasa residual de <i>Guadua angustifolia</i>	47
4.3 Rendimiento y pérdida de biomasa de biochar de residuos de <i>Guadua angustifolia</i>	48
4.4 Características fisicoquímicas de biochar de residuos de <i>Guadua angustifolia</i>	50
4.4.1 Morfología del biochar de <i>G. angustifolia</i>	50
4.4.2. Análisis químico elemental de biochar de <i>G. angustifolia</i>	51
4.4.3 Análisis BET del biochar de <i>G. angustifolia</i>	52
4.4.4 Química de grupos funcionales del biochar de <i>G. angustifolia</i>	52
4.4.5 pH y conductividad eléctrica de <i>G. angustifolia</i>	53
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Subclasificación y ejemplos de los dos grupos principales de la biomasa...	2
Tabla 2.	Procesos de conversión de la biomasa.	5
Tabla 3.	Taxonomía de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	9
Tabla 4.	Cronograma de toma de muestras de <i>Guadua angustifolia</i> para análisis de secado natural.	20
Tabla 5.	Parámetros físicos de los residuos de <i>G. angustifolia</i>	34
Tabla 6.	Área superficial específica de los biochar de <i>G. angustifolia</i> producidos a distintas condiciones de pirólisis lenta.	42
Tabla 7.	Comparación del análisis proximal de <i>Guadua angustifolia</i> del presente trabajo con otros estudios.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Composición química de la biomasa vegetal.....	4
Figura 2.	Distribución mundial de bambú. a Bambúes leñosos del Neotrópico, b Bambúes leñosos templados del norte, c Bambúes leñosos del Paleotrópico y d Bambúes herbáceos.....	7
Figura 3.	Variación de color en <i>Guadua angustifolia</i> durante varios días de secado.	31
Figura 4.	Curva de humedad de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	32
Figura 5.	Curva de sólidos totales y sólidos volátiles de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	33
Figura 6.	Variación del rendimiento y pérdida de biomasa en los biochar de residuos de <i>G. angustifolia</i> producidos a diferentes condiciones de pirólisis.	35
Figura 7.	Micrografías por SEM de los biochar de <i>G. angustifolia</i> producidos a A) 450 °C, B) 550 °C, C) 600 °C, D) 700 °C y E) 800 °C a un tiempo de 30 minutos.....	36
Figura 8.	Presencia de macroporos en el biochar de <i>G. angustifolia</i> producido a: A) 550 °C, y B-C) 800 °C a un tiempo de 30 minutos, y D-E) 600 °C a un tiempo de una hora.	37
Figura 9.	Micrografías por SEM de los biochar de <i>G. angustifolia</i> producidos a A) 450 °C, B) 550 °C, C) 600 °C, D) 700 °C y E) 800 °C a un tiempo de 1 hora.	38
Figura 10.	Variación en la composición elemental de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia de 30 minutos.....	39
Figura 11.	Espectros de elementos presentes en puntos articulados del biochar de <i>G. angustifolia</i> obtenido por pirólisis a 550 °C y 30 minutos.....	40
Figura 12.	Variación en la composición elemental de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia de 1 hora.	41
Figura 13.	FT-IR de los biochar de <i>G. angustifolia</i> producidos a distintas condiciones de pirólisis lenta.	43
Figura 14.	Valores de pH de los biochar producidos por pirólisis a	

	distintas temperaturas y tiempo de residencia.	44
Figura 15.	Valores de conductividad eléctrica de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia.....	45

RESUMEN

El bambú incluye 1500 especies de interés económico, social y ecológico, incluyendo a *Guadua angustifolia* Kunth. *G. angustifolia* es una especie nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador con alta disponibilidad de biomasa y diversidad de usos y aplicaciones como la producción de biochar por medio de procesos termoquímicos. Esta investigación evaluó el efecto de la temperatura y tiempo de residencia en las propiedades fisicoquímicas del biochar de residuos de *G. angustifolia* obtenido mediante pirólisis lenta. Para ello, se hizo un estudio previo del secado natural de *G. angustifolia* durante 3 meses y un análisis proximal. Se produjo biochar variando la temperatura (450, 550, 600, 700 y 800 °C) y tiempo de residencia (30 minutos y 1 hora). Además, se determinó las propiedades fisicoquímicas de cada biochar por métodos analíticos como: SEM-EDS, BET, FTIR, pH y conductividad. Los resultados mostraron que el secado y cambio de color de *G. angustifolia* ocurrió entre los días 11 y 28 hasta el día 80. Asimismo, se encontró un 13,03% de humedad, 77,76% de materia volátil, 3,63% de cenizas y 16,38% de carbono fijo en sus residuos. De las propiedades del biochar analizado, se destacó BG 800 °C-1h con una mayor área superficial específica ($597 \frac{m^2}{g}$), BG 600 °C-30m con más grupos funcionales oxigenados, BG 800 °C-30m, BG 600 °C-1h y BG 550 °C-1h por presentar macroporos definidos, y BG 550 °C-30m por trazas de minerales encontradas en su superficie. La temperatura es la variable que más influyó en las propiedades del biochar de *G. angustifolia*.

Palabras claves: cañas secas, *Guadua angustifolia*, biochar, pirólisis lenta, temperatura de pirólisis

ABSTRACT

Bamboo includes 1500 species of economic, social and ecological interest, including *Guadua angustifolia* Kunth. *G. angustifolia* is a native species of Colombia, Venezuela and Ecuador with high biomass availability and diversity of uses and applications, such as biochar production through thermochemical processes. This research evaluated the effect of temperature and residence time on the physicochemical properties of *G. angustifolia*-residues biochar obtained by slow pyrolysis. For this, a previous study of natural drying of *G. angustifolia* for 3 months and a proximal analysis were carried out. Biochar was produced by varying the temperature (450, 550, 600, 700 and 800 °C) and residence time (30 minutes and 1 hour). In addition, the physicochemical properties of each biochar were determined by analytical methods such as SEM-EDS, BET, FT-IR, pH, and Electric conductivity. The resulted showed that the drying and color change of *G. angustifolia* occurred between days 11 and 28 until day 80. Besides that, it was reported 13.03% moisture, 77.76% volatile matter, 3.63% ash and 16.38% fixed carbon in their residues. From the properties of the analyzed biochar, BG 800 °C-1h stood out with a greater specific surface area ($597 \frac{m^2}{g}$), BG 600 °C-30m with more oxygenated-functional groups, BG 800 °C-30m, BG 600 °C-1h and BG 550 °C-1h for presenting defined macropores, and BG 550 °C-30m for traces of minerals found on its surface. Temperature is the variable that most influenced the properties of *G. angustifolia* biochar.

Keywords: dry culms, *Guadua angustifolia*, biochar, slow pyrolysis, pyrolysis temperature

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

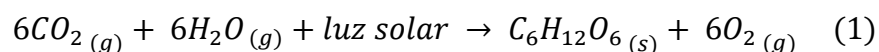
1.1.1 Biomasa: definición y características generales

1.1.1.1 Definición de biomasa

En el contexto de la producción de energía mundial, la biomasa emerge como una alternativa sostenible para el desarrollo energético [1,2]. El término biomasa, de manera general, se refiere a toda materia orgánica renovable viva o muerta que proviene de plantas y animales en un lapso corto de tiempo [1–3]. Se excluye a los combustibles fósiles como el petróleo por ser materiales fosilizados, es decir han pasado por procesos geológicos de millones de años para su transformación [4]. Es difícil establecer una definición exacta para la biomasa debido a su heterogeneidad, usos y origen [1]; por lo que en el Apéndice A de Basu [4], se puede observar definiciones legales que se aplican en los Estados Unidos.

1.1.1.2 Formación de la biomasa

La biomasa se forma directa o indirectamente por medio del proceso de fotosíntesis [1]. La fotosíntesis es un proceso metabólico necesario para la vida en la Tierra, en el que las plantas y otros organismos a partir de sustratos como la luz solar, agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) sintetizan compuestos orgánicos y oxígeno (O_2) [3]. En resumen, las plantas absorben la energía lumínica procedente del sol, en una longitud de onda entre 425–450 nm (luz azul) y 600–700 nm (luz roja), por medio de un pigmento llamado clorofila ubicada en los cloroplastos de sus hojas. Mediante una serie de reacciones dentro de esas estructuras, se rompe una molécula de H_2O (absorbida por medio de las raíces) y se generan protones, electrones y O_2 como un subproducto [4]. A su vez, esto permite la conversión de CO_2 procedente de la atmósfera en moléculas de glucosa ($C_6H_{12}O_6$). Todo esto según la Ecuación 1 detallada en Mamvura y Danha [3].



La glucosa es el precursor para generar compuestos de alto peso molecular o formar nuevos tejidos para el crecimiento de las plantas. También, por otro proceso conocido como respiración celular, la glucosa se puede oxidar para liberar energía en forma de ATP (Adenosín Trifosfato) necesario para su metabolismo y crecimiento [4].

La fotosíntesis transforma la energía lumínica en energía química, que se almacena en las plantas. Así, los humanos y los animales pueden aprovechar esa energía al consumir plantas o productos derivados de las mismas. Como en las plantas, esta energía química se obtiene mediante la respiración celular en forma de ATP, y en el proceso se toma oxígeno y se libera dióxido de carbono a la atmósfera. El CO₂ liberado se puede usar para generar nuevamente biomasa [4].

1.1.1.3 Clasificación de la biomasa

Las diferencias en cuanto a composición, origen y variedad y otras características en toda la biomasa no permiten una clasificación exacta de la misma [1]. El Comité Europeo de Normalización (CNE) en su estándar EN 14961 clasifica y especifica la biomasa sólida en cuatro categorías: 1) Biomasa leñosa, 2) Biomasa herbácea, 3) Biomasa frutal y 4) Mezclas intencionadas o no de biomasa de distinto origen [2,4]. Un detalle de la subclasificación de cada categoría se observa en Bonechi [2]. Sin embargo, para fines prácticos la biomasa puede ser dividida en dos grandes grupos: Biomasa virgen o natural y Biomasa residual [4]. La subclasificación y ejemplos de estos grupos se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Subclasificación y ejemplos de los dos grupos principales de la biomasa.

Grupo principal	Subclasificación	Ejemplos
Biomasa virgen o natural	Biomasa terrestre	1. Biomasa forestal 2. Biomasa herbácea 3. Cultivos que proveen energía 4. Cultivos agrícolas
	Biomasa acuática	1. Algas 2. Plantas acuáticas

Biomasa residual o desechos	Desechos municipales	1. Residuos sólidos municipales 2. Biosólidos y aguas residuales 3. Gas de vertederos
	Desechos sólidos agrícolas	1. Ganadería y estiércol 2. Residuos de cultivos agrícolas
	Residuos forestales	1. Residuos de corteza, hojas y de suelo
	Desechos industriales	1. Madera de demolición, aserrín 2. Grasa/aceite usado

Fuente: Sikarwar et al., 2016, y Basu, 2018

1.1.1.4 Composición de la biomasa

La composición química es variable en toda la biomasa vegetal, el grupo más diverso en el planeta. Según la Figura 1, la biomasa vegetal se conforma de sustancias de bajo peso molecular, que incluyen sustancias orgánicas extraíbles (grasas, proteínas, ceras, aceites, almidones, azúcares simples, entre otros) y materia inorgánica (cenizas), y sustancias macromoleculares que conforman lo que se conoce como lignocelulosa [3].

La lignocelulosa es la parte fibrosa de las plantas que no se consume, como por ejemplo la cáscara de la semilla del arroz. Esta incluye a la celulosa, hemicelulosa y lignina, que son componentes claves de la pared celular de las plantas [4]. A breves rasgos, la celulosa es un polímero lineal conformado por unidades monoméricas de D-glucosa (hasta 10 000 unidades) unidas por enlaces éter, y cuya estructura se dispone como haces de fibra para dar resistencia a las plantas [1–3]. En cambio, la hemicelulosa consiste de varios polímeros cortos, ramificados y heterogéneos compuestos por azúcares de cinco o seis carbonos, y cuya función es conectar la lignina y las fibras de celulosa [1–3]. Ejemplos de hemicelulosas se detallan en la Figura 1. Por último, la lignina es un polímero tridimensional reticulado formado por unidades de fenilpropano [2,5]. Se incrusta y une a la hemicelulosa y fibras de celulosa, y brinda resistencia mecánica, soporte e impermeabilidad a las plantas. Es el polímero más abundante en el planeta con más de 300 mil millones de toneladas y un incremento anual de 20 mil

millones de toneladas, según Ludmila et al. [6]. Esto ha servido de inspiración para desarrollar tecnologías de conversión de ese compuesto en productos de valor añadido [1].

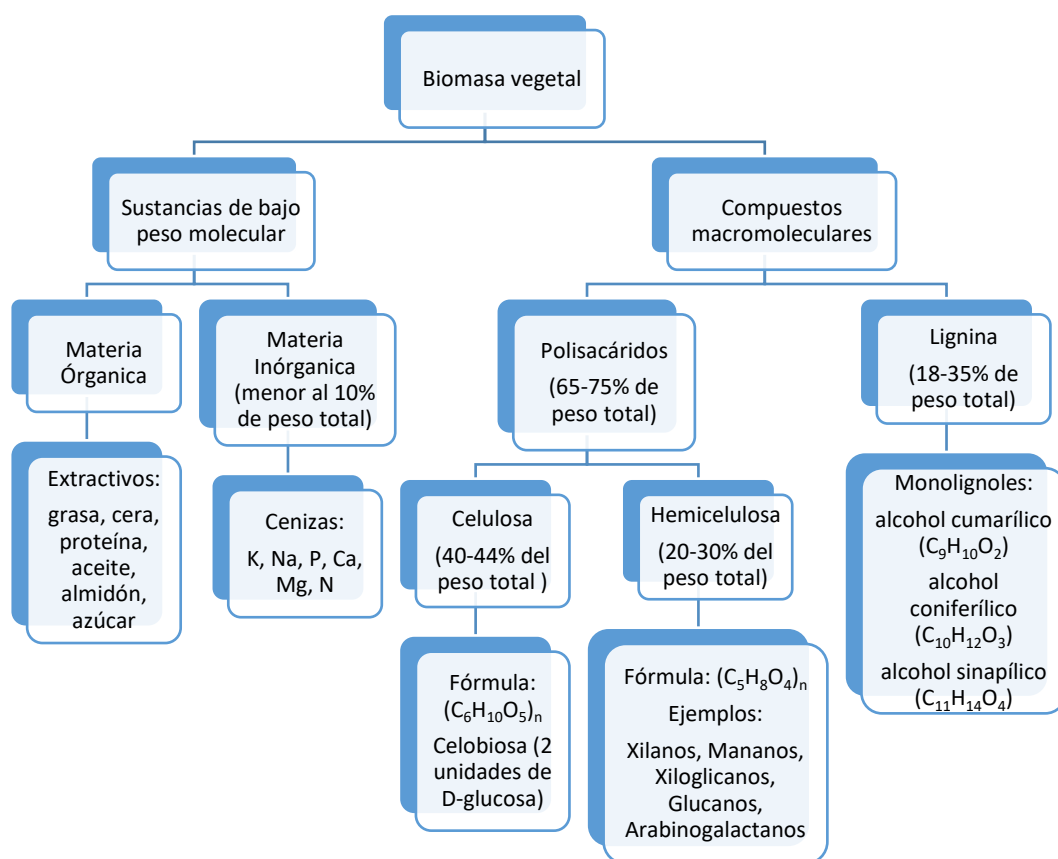


Figura 1. Composición química de la biomasa vegetal.

Fuente: Bonechi et al., 2017; Mamvura y Danha, 2020; y Nzihou, 2020.

1.1.1.5 Conversión e Importancia de la biomasa

La biomasa se puede aprovechar mediante una serie de tratamientos y tecnologías de conversión para desarrollar biomateriales, obtener compuestos químicos y servir como fuente de energía [7–9]. Estas tecnologías de conversión incluyen métodos termoquímicos, bioquímicos y fisicoquímicos, los cuales se visualizan en la Tabla 2. A partir de esos métodos se obtienen productos gaseosos (biogas, gas pobre, syngas, sustituto de gas natural), líquidos (etanol, biodiesel, metanol, aceite vegetal, aceite de pirólisis) y sólidos (biochar, hidrochar, biocoke, carbón) [4].

Tabla 2. Procesos de conversión de la biomasa.

Proceso/Tecnología	Materia prima	Producto final usable
Conversión termoquímica	Combustión	(I) Residuos agrícolas (II) Residuos leñosos (III) Desechos animales
	Pirólisis	(I) Aceite de pirólisis (II) Gas productor (III) Carbón
	Gasificación	(I) Gas productor (II) Combustibles líquidos (III) Carbón
	Licuefacción	(I) Fertilizante/biocombustible (II) Gas de síntesis (III) Combustibles líquidos
Conversión bioquímica	Digestión anaeróbica	(I) Desechos animales (II) Lodos de depuradora (III) Electricidad
	Fermentación	(I) Combustibles líquidos (bioetanol) (II) Azúcares (III) Almidón
Conversión fisicoquímica	Esterificación/Transesterificación	(I) Aceites vegetales (II) Grasas animales (III) Aceites usados (II) Glicerol

Fuente: Tursi, 2017

La biomasa se considera renovable porque procede de fuentes naturales que se pueden regenerar [1,4]. Así, los países en desarrollo han usado a lo largo de los años la biomasa como una fuente de energía para cocinar [10]. Y actualmente la biomasa se ocupa dentro de cuatro industrias: 1) química (producción de metanol, fertilizantes, fibras sintéticas y otros productos químicos) 2) de energía (generación de calor y electricidad), 3) de transporte (producción de gasolina y diésel), ambiental (captura de CO₂ y otros contaminantes) [4].

1.1.2 El Bambú: un recurso de biomasa importante a nivel mundial y en Ecuador

1.1.2.1 El bambú a nivel mundial

Dentro de los cultivos agro-industriales, el bambú se destaca por su importancia a nivel mundial. El bambú u “oro verde” es una planta forestal no maderable que pertenece a la subfamilia Bambusoideae, de la familia Poaceae (familia de las gramíneas) [11]. Es una hierba gigante, perenne y monocotiledónea compuesta por dos partes características: los rizomas y los culmos o cañas [12–14]. El rizoma es la parte subterránea, de naturaleza simpodial o monopodial, que contiene yemas de las cuales se originan brotes que formarán los culmos [15]. El culmo es la parte superior de material leñoso, de donde emergen el resto de los órganos (hojas, ramas, flores y frutos). Este es cilíndrico, hueco y de pared gruesa, que se divide en varias secciones en forma de “tubos” conocidos como entrenudos, los cuales están separados por nudos o diafragmas [15,16].

El bambú se extiende de manera natural en las regiones tropicales, subtropicales y templadas entre las latitudes, 46-50° N y 47° S [13,16,17], repartido en 4 continentes: América, África, Asia y Oceanía [18]. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en 2020 se estima alrededor de 35 millones de hectáreas de bambú en el mundo, de las cuales el 71% está en Asia, el 15,4% en Sudamérica, y el 13,3% en África [19]. China, India y Brasil son los países que reportan un mayor recurso de bambú [17].

El bambú alberga alrededor de 119-123 géneros que incluyen unas 1500 especies, aproximadamente [11,15,16]. Esas especies a su vez, se agrupan dentro de 3 grandes tribus según sus caracteres moleculares y morfológicos [15], e incluyen: 1)

Arundinarieae, con 546 especies que corresponden a bambúes leñosos templados; 2) Bambuseae, con 812 especies y se conforma por bambúes leñosos tropicales, los cuales se agrupan en dos clados (bambúes leñosos del Neotrópico y del Paleotrópico), y 3) Olyreae, con 124 especies que se refiere a bambúes herbáceos [11,16]. En Akinlabi et al. [15], en su tabla 1.5 se puede observar la clasificación del bambú en las 3 tribus con sus respectivos subtribus y géneros.

La distribución mundial del bambú, en lo que respecta a los bambúes leñosos (templados, del Neotrópico y del Paleotrópico) y bambúes herbáceos, se visualiza en la Figura 2. Así mismo, la distribución de todas las especies de bambú en el mundo se ve influenciada por factores como las precipitaciones, la altitud, la temperatura y el tipo de suelo. El bambú crece de manera natural en lugares con una precipitación anual entre 1200 y 4000 mm y a una temperatura media anual entre 8 y 36 °C [15]. Se desarrolla en suelos arcillosos, arenosos, lateríticos duros, y ricos en aluviones, en un rango amplio de hábitats que van desde el nivel del mar hasta los 4300 metros [16].

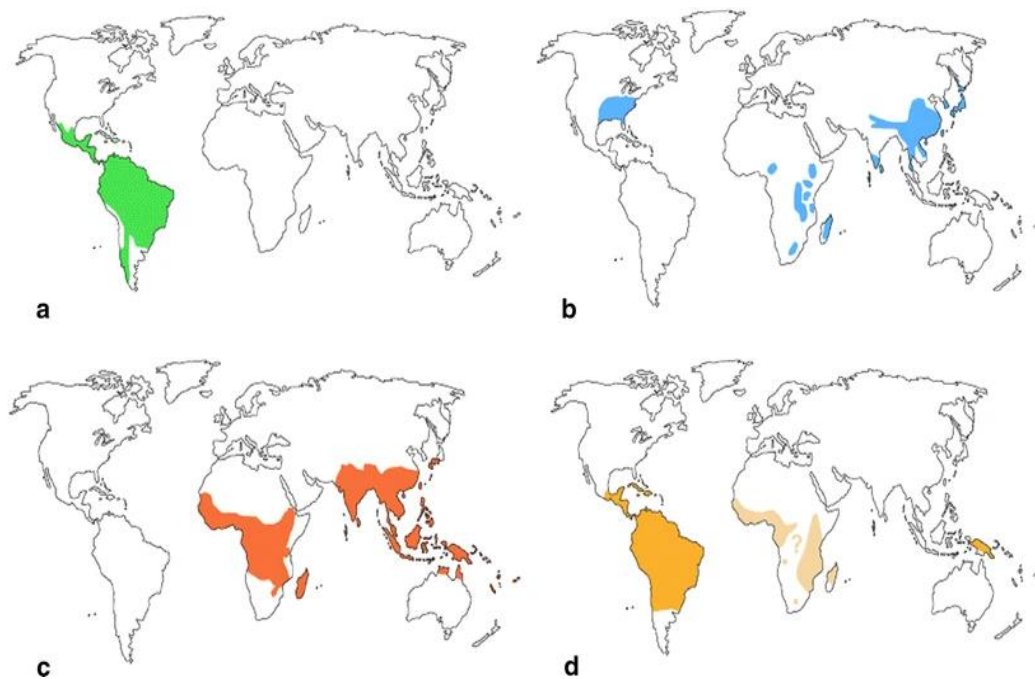


Figura 2. Distribución mundial de bambú. a Bambúes leñosos del Neotrópico, b Bambúes leñosos templados del norte, c Bambúes leñosos del Paleotrópico y d Bambúes herbáceos.

Fuente: Yeasmin et al., 2015

El bambú se considera una “planta multifuncional” debido a sus características particulares: 1) tasa de crecimiento rápido (hasta un metro por día) [13,14], 2) no exhibe crecimiento secundario, es decir no crece en grosor sino en altura (hasta 36 metros en

seis meses) [11,12], 3) corto tiempo de maduración (3-6 años) [12], 4) alta biomasa por ser una planta C4 [17], 5) facilidad de cultivo [13], 6) capacidad regenerativa y de resistencia [15], 7) alto rendimiento [17], y 8) ser un recurso económico, sustentable y altamente disponible [13,15,20]. Esto ha permitido obtener del bambú un sinnúmero de productos comerciales y aplicaciones culturales, ecológicas, alimentarias, industriales, energéticas, terapéuticas, medicinales, de construcción, agrícolas, domésticas y artísticas [14,17,21]. Esas aplicaciones pueden ser agrupadas en 3 aspectos: económicos, sociales y ambientales [18].

1.1.2.2 El bambú en Ecuador

América Latina tiene un recurso diverso de bambú con 21 géneros y 345 especies [16], siendo Brasil, Chile, Colombia, Ecuador y México, los países que disponen una mayor área de ese recurso [22]. Sobre todo, es una región en el que bambú es un recurso importante para la economía local [23].

En Ecuador existe una superficie de aproximadamente 600 000 hectáreas entre plantaciones y áreas naturales, en donde se desarrolla el bambú [24,25]. Ese total les corresponde a 16 provincias, y se distribuye el 66,5% en la Región Costa, el 10% en la Región Sierra y el 23,5% en la Región Amazónica [24]. 46 especies de bambú leñoso son nativas en el país y se reparten en 5 géneros: *Arthrostylidium* (3 especies), *Aulonemia* (5 especies), *Chusquea* (31 especies), *Guadua* (4 especies) y *Rhipidocladum* (3 especies) [24]. En cuanto, a especies introducidas se encuentran: *Bambusa tulda* (bambú de India), *Bambusa ventricosa*, *Dendrocalamus asper* (bambu gigante), *Dendrocalamus latiflorus*, *Dendrocalamus longispiculata*, *Dendrocalamus oldhamii*, *Melocanna baccifera*, *Phyllostachys aurea*, *Phyllostachys nigra* y *Phyllostachys pubescens* (bambú moso de China)[23].

Las distintas especies del bambú en el país se encuentran desde el nivel del mar hasta los 4300 msnm, y se mezclan entre cultivos, riberas de los ríos o laderas de montañas [23,24]. En los Andes ecuatorianos, se reporta en mayor medida la presencia del género *Chusquea* (suyos, surillos y moyas) mientras que el género *Guadua* (caña guadua, caña brava o caña mansa) abunda en la Costa ecuatoriana [22,23]. El género *Arthrostylidium* se da en los descensos externos de la Cordillera Oriental [23]. Sin embargo, de todas

esas especies *Guadua angustifolia* Kunth es la que tiene mayor representación e importancia económica, cultural y social en el país [23].

1.1.2.3 Información taxonómica, morfológica e importancia de *Guadua angustifolia* Kunth

Guadua angustifolia Kunth es una gramínea como el arroz, maíz o caña de azúcar, que se agrupa dentro de los bambúes leñosos [23,26]. Es nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador, pero también crece en países de Centroamérica y Sudamérica [20,25]. Esta especie fue nombrada por Karl S. Kunth en 1822, y significa “hoja angosta”. A su vez, “guadua” es el término característico que usan los indígenas de Colombia y Ecuador para referirse a esa especie; y también es el nombre que se le da al género de bambús más importante en América Latina [23]. La taxonomía de esta especie se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Taxonomía de *Guadua angustifolia* Kunth.

Clase	Equisetopsida C. Agardh
Subclase	Magnoliidae Novák ex Takht.
Superorden	Lilianaes Takht.
Orden	Poales Small
Familia	Poaceae Barnhart
Subfamilia	<i>Bambusoideae</i> Lueres.
Tribu	<i>Bambuseae</i> Kunth ex Dumort.
Subtribu	<i>Guaduinae</i> Soderstr. & R.P. Ellis
Genero	<i>Guadua</i> Kunth
Especie	<i>Guadua angustifolia</i> Kunth

Fuente: Tropicos.org., 2023

En el país *G. angustifolia* se conoce como guadua, caña guadua o caña brava. Esta especie crece naturalmente en forma de manchas o se establece en plantaciones, desde el nivel del mar hasta los 1600-1800 msnm, en zonas tropicales, subtropicales y templadas del país [23,27]. Está presente en quebradas y orillas de los ríos formando asociaciones o “guaduales”, es decir una comunidad de guaduas en sus distintas fases (renuevo, juvenil, madura, sobre madura, seca) [28]. Las condiciones ideales para su crecimiento son: temperatura de 20 a 36 °C, aunque puede estar debajo de los 11 y 36 °C, nivel de lluvias entre 1.300 y 4.000 mm al año, humedad relativa del 80% y luminosidad de 1.800 y 2.000 horas/luz/año por unas 5-6 horas/luz/día [23].

Morfológicamente, *G. angustifolia* consta de raíz, rizoma, tallo, hojas, flores y frutos. Se presenta una breve descripción sobre cada parte:

- **Rizoma:** es un tallo modificado subterráneo necesario para la propagación y sostén de la guadua [29–31]. Se conforma de un cuello y el rizoma en sí. El cuello es elongado sin presencia de yemas, y se une al rizoma, una estructura corta, gruesa, segmentada asimétrica que tiene entrenudos, nudos, yemas laterales y raíces adventicias [29,30,32]. Las yemas permanecen en los nudos, y se activan cuando la guadua alcanza su longitud para formar nuevos rizomas [30]. El sistema de rizomas es paquimorfo o crece/se ramifica de forma simpodial, es decir el rizoma crece horizontalmente a partir de la base (rizoma madre) de un culmo existente y se curva o alarga hacia arriba, dando origen a un nuevo brote que formará una guadua [32]. Así, los nuevos brotes están unidos de cerca a guadas ya existentes por medio de las ramificaciones de diversos rizomas, que en conjunto componen grupos o “clumps” [32].
- **Raíces:** Son estructuras que se encargan de absorber agua y nutrientes. Son del tipo adventicio, simétricas en tamaño y forma y surgen de los nudos del rizoma [32]. Una parte se origina de la zona más baja (ventral) del rizoma y toma una dirección vertical; y la otra, de las ramificaciones y partes laterales del rizoma conforme este se desarrolla horizontalmente [31].
- **Tallo:** Se conoce como culmo y es el órgano sostén de la guadua, que se desarrolla apicalmente a partir de la yema terminal de un rizoma [32,33]. Es leñoso, cilíndrico, hueco, recto y lignificado [33] con varios segmentos o “tubos” conocidos como entrenudos, los cuales están separados por nudos o diafragmas [15,16,30]. El culmo se divide en 3 zonas: 1) basal, parte baja que tiene ramas basales, 2) media o “caña”, lo que se ocupa cuando la guadua madura, y 3) apical, parte aérea con ramas apicales [28]. Tiene un diámetro de 10 a 20 cm, pudiendo llegar hasta los 22-25 cm [25,28]; y una longitud total desde 15 hasta 30 m [30]. La guadua alcanza su madurez a los 4-5 años [28].
- **Ramas:** Se originan de las yemas de los nudos de un culmo, y pueden ser ramas basales o apicales [30]. Las ramas **basales** se localizan en el tercio inferior de la guadua, son espinosas y duras con función de protección [30,31]. Las ramas

apicales se ubican en el tercio superior, son delgadas y largas con hojas típicas (follaje) de una guadua [30,31].

- **Hojas:** Se distinguen dos tipos de hojas: caulinares y típicas. Las hojas **caulinares** protegen al culmo que está en su etapa inicial de crecimiento (renuevo) y a las yemas que forman ramas y hojas de follaje [29–31]. Nacen de los nudos de ese tallo, y son triangulares, ásperas, de color café y caducas, es decir se caen cuando la guadua alcanza su madurez [30,34]. Las hojas **típicas**, o también llamadas hojas de follaje, son las que se encargan del proceso de fotosíntesis [31]. Son verdes, simples, alternas y lanceoladas, con presencia de un pseudopecíolo que une la vaina y la lámina cubierta de pelos transparentes en el haz [29,30].
- **Flores:** Las flores se disponen en inflorescencias, es decir se agrupan en forma de espigas o espiguillas al final de un eje (rama) o conjunto de ejes, que surgen de un eje común llamado raquis primario [29]. Esto da como resultado inflorescencias con aspecto de panícula y con una prolongación indeterminada [29]. Las flores son pequeñas, de color rosado claro, no tan visibles, hermafroditas, es decir contienen ambas estructuras sexuales (pistilo y gineceo), y están protegidas por brácteas (palea y lemas) [30,35]. La guadua florece de manera esporádica, y tiene un intervalo irregular en su ciclo de floración [29,30].
- **Fruto y Semilla:** El fruto es un cariopsis similar a un grano de arroz, es seco, delgado e indehisciente [29]. La semilla, al igual que una semilla de arroz, es blanca con una cubierta color café, y mide 5 a 8 mm de largo y 2 a 3 mm de grosor [30,35].

En Ecuador, *G. angustifolia* es una especie de bambú de gran importancia a nivel social, ecológico y económico. Como se mencionó previamente, 600,026 ha de bambú están presentes en el país, de ese total el 36% corresponde a *G. angustifolia*; con una producción de 15'531.400 tallos (culmos) al año [25]. *G. angustifolia* es un recurso que se destaca principalmente por su uso tradicional en la construcción de viviendas y en la agricultura, desde tiempos prehispánicos. Aunque también se reporta su uso en la elaboración de: artesanías, muebles, estructuras, tejidos, biocarbón, latillas, combustible, entre otros [14,36]. Además, *G. angustifolia* sirve como un “banco” donde

capta y almacena CO₂, mantiene la humedad del suelo pues almacena agua en sus tallos, regula los caudales hídricos, etc. [34]. Por otro lado, la producción de *G. angustifolia* genera empleo e ingresos a las comunidades rurales no solo en Ecuador sino a nivel mundial [34]. Dada la importancia ecológica, económica y social que tiene *G. angustifolia* en el país, el aprovechamiento de su biomasa residual llama la atención desde un punto de vista energético y agrícola.

1.1.3 El Biochar: un biomaterial inspirado en la biomasa

1.1.3.1 Definición y características del biochar

Como se mencionó anteriormente, de *G. angustifolia* se puede obtener el biochar como un producto de aprovechamiento de su biomasa. La Iniciativa Internacional Biochar (IBI) define al biochar o biocarbón como “un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de la carbonización de la biomasa en un ambiente con oxígeno limitado” [37]. Es decir, se trata de un material o residuo sólido que resulta de descomponer la biomasa mediante procesos termoquímicos en un ambiente limitado con o sin oxígeno y a bajas temperaturas [37,38].

El biochar tiene un alto contenido en Carbono, pero también contiene elementos como Hidrógeno, Oxígeno, trazas de Nitrógeno y Azufre y cenizas [39]. Además, posee propiedades como: alta presencia de carbono orgánico y recalcitrante, gran estructura porosa y área superficial específica, elevada capacidad de absorción y estabilidad térmica, alcalinidad, grupos funcionales en su superficie, etc. [9,39,40]. Esas propiedades físicas y químicas del biochar están influenciadas por el tipo de biomasa utilizada, el proceso termoquímico y las condiciones empleadas (temperatura, tiempo, tamaño de partícula, etc.) [39]. Siendo así, un biomaterial excelente para varias aplicaciones.

1.1.3.2 Origen del biochar

El término “biochar” tiene su origen en la Amazonía brasileña con el nombre de *Terra preta*, es decir tierras negras y fértiles de 2 metros de espesor resultado de la quema de biomasa que poseen un alto contenido de nutrientes, humedad y procesos microbianos relacionados [41]. Los primeros registros sobre *Terra preta* se remontan a 1868 por

James Orton y a 1870 por Charles Hartt. Aunque fue Barrington Brown, en 1878, quien usó por primera vez el término *Terra preta* para referirse a esos suelos [42].

Terra preta se formó a partir de desechos de cocina, desechos humanos y animales, cenizas ricas en minerales y carbón vegetal, durante miles de años. El resultado fueron suelos con mayor disponibilidad de materia orgánica, mayor retención de agua y nutrientes como nitrógeno, fósforo, calcio y potasio, con un pH más elevado y una mayor carga microbiana, que los hicieron fértiles y disponibles para las necesidades agrícolas de las comunidades indígenas que se establecieron en la Amazonía Brasileña [42].

1.1.3.3 Métodos de producción del biochar

La materia prima para elaborar el biochar es la biomasa, de manera especial la biomasa residual (residuos y desechos) [43] que proviene de cultivos agrícolas e industriales, especies leñosas y herbáceas, industria de la madera, bagazo, desechos sólidos municipales, aserrín, biosólidos, pasto, desechos del procesamiento de alimentos, desechos animales, plantas acuáticas y algas, etc. [7].

La producción de biochar se puede realizar por métodos termoquímicos como la pirólisis, la gasificación, la carbonización hidrotermal, la torrefacción, etc. [44]. De esos métodos se destacan los procesos de pirólisis y gasificación [45]. En la pirólisis se ha descrito un mayor rendimiento en producción de biochar [45].

1.1.3.4 Usos del biochar

El uso del biochar se ha revisado y descrito en: la producción de calor y energía, secuestro de carbono y mitigación de gases de efecto invernadero, inmovilización de metales pesados y contaminantes orgánicos en agua y suelo, tratamiento y descontaminación de aguas servidas, en aplicaciones catalíticas, como suplemento alimentario para animales y, sobre todo, en el mejoramiento de suelos agrícolas [9,45–48].

1.1.4 Pirólisis, el método conocido para producir biochar

La pirólisis es un proceso termoquímico que consiste en descomponer la biomasa a temperaturas de entre 400 y 800 °C en ausencia de oxígeno [49–51]. Esta tecnología permite transformar la lignocelulosa presente en la biomasa en productos con alto valor energético y compuestos químicos [52]. Así, los productos que se obtienen mediante este proceso incluyen una fracción líquida (bio-aceite), sólida (biochar) y gaseosa (gas combustible) [50,51]. La proporción de cada producto varía conforme el método y las condiciones de pirólisis establecidos, y las características de la biomasa empleada [49,52,53].

El proceso generalizado de la pirólisis según Tursi [1], se detalla a continuación. En primer lugar, la biomasa cruda se seca a temperaturas entre 100 y 120 °C. Enseguida, se destilan ciertos gases (N_2 , CO y CO_2), ácido acético y metanol cuando la temperatura sube a 275 °C. A continuación, ocurre un proceso de eliminación de sustancias químicas (cetonas, aldehídos, fenoles, ésteres), CO_2 , CO, CH_4 , C_2H_6 y H_2 , resultado de reacciones exotérmicas que rompen enlaces débiles en los componentes estructurales de la biomasa, a temperaturas entre 280 y 350 °C. Finalmente, se forma H_2 , CO y carbono en una mayor proporción, mientras se evaporan todos los compuestos volátiles a partir de los 350 °C. El carbono queda en forma de un residuo sólido, que se conoce como biochar.

La pirólisis se puede dividir en tres tipos basado en las condiciones de operación: pirólisis lenta (*slow pyrolysis*), pirólisis rápida (*fast pyrolysis*), y pirólisis flash (*flash pyrolysis*) [51]. La pirólisis lenta o pirólisis convencional tiene como objetivo una mayor producción de biochar a bajas temperaturas (alrededor de 400 °C) [4]. Sin embargo, se puede trabajar entre un rango de temperatura de 300-700 °C a una velocidad de calentamiento moderado (de 1°C/min a 30 °C/min) y un tiempo de residencia de 30-60 minutos para obtener ese producto [52,54]. La pirólisis rápida se utiliza principalmente para la generación de bioaceite, el cual se obtiene a velocidades altas de calentamiento (sobre los 300 °C/min) y tiempo de residencia cortos (de 0,5 a 10 s) [54,55]. El rango de temperatura para esa reacción debe estar entre 425 y 600 °C [4]. La pirólisis flash se caracteriza por calentar la biomasa rápidamente (1000 °C/s) por encima de los 650 °C, en un tiempo corto (300-1500 ms) para conseguir un mayor rendimiento de gas combustible [1,4].

1.1.5 *G. angustifolia*, una alternativa para elaboración de biochar

Como se ha mencionado previamente, el bambú es un recurso vegetal económico, sustentable y altamente disponible, del que se han realizado estudios de producción de biochar con fines de aplicación. A continuación, se citan algunos trabajos relacionados con bambú y *G. angustifolia*.

Chu et al. [56] evaluaron los efectos que tiene el biochar como aditivo alimentario. Ellos agregaron 0,3 % de biochar de bambú en la dieta basal de cerdos de engorde; y reportaron un aumento en su peso, una mejora en su respuesta inmunológica (aumento en las concentraciones en suero de inmunoglobulinas G y A) y una mejora en la composición de su microflora fecal.

Wang et al. [57] estudiaron los efectos sobre los microorganismos de la rizósfera que resultan de la aplicación de biochar en suelos de cultivos de arroz contaminados con cadmio (Cd). Se encontró que el biochar de bambú estimula la colonización de bacterias promotoras de crecimiento (*Kaistobacter*, *Sphingobium* y *Rhizobiaceae*) y microorganismos resistentes a metales (*Rhodocyclaceae* y *Geobacter*) en la rizósfera y se forma una barrera que evita el ingreso de Cd a la planta.

Li et al. [58] aplicaron distintas concentraciones de biochar de bambú (1 al 7% p/p) en suelo contaminado con cadmio y zinc (Zn) e investigaron su efecto sobre el crecimiento y potencial de fitorremediación de *Salix psammophila*. El tratamiento con biochar al 3% evidenció un mayor crecimiento de *S. psammophila* y acumulación de Cd y Zn en sus tejidos.

Masís et al. [41] en su investigación discuten cómo varían las propiedades físicas y químicas de dos biochar de bambú guadua y madera de pino que se produjeron en un gasificador *top-lit updraft* (TLUD) comercial. Los biochar se produjeron a partir de lotes triplicados de bambú guadua y madera de pino, y se los analizó para determinar el área superficial específica, la porosidad, hidrofobicidad, pH, capacidad de intercambio iónico, composición elemental y proximal, densidad esquelética, y estructura por Microscopía electrónica de barrido. Se reporta una variabilidad mayor en las propiedades analizadas para el biochar de bambú guadua a comparación del biochar de madera de pino, que a su vez está asociado con las condiciones en las que operó el gasificador.

Villagra et al. [59] analizaron el efecto de la enmienda del biochar de *G. angustifolia* en suelos degradados (suelo franco limoso y suelo franco arenoso) sobre el rendimiento en la producción de tomates. Se aplicó biochar en distintas dosis (1, 2,5 y 5 % en masa) en combinación con sustrato de suelo seco y tamizado para formar mezclas suelo-biochar, en donde se trasplantó plántulas de tomates. Se analizó las propiedades fisicoquímicas del biochar, y en cada suelo enmendado se midió la hidrofobicidad, acidez, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y retención de agua, el contenido de agua disponible y la capacidad de aire. Se encontró un mayor rendimiento de tomates mayores a 200 g en el suelo franco arenoso (350 %) y suelo franco limoso (151%). A la par, que el biochar aplicado aumentó la retención de agua.

Por consiguiente, los estudios detallados previamente constituyen una base para la producción de biochar de *G. angustifolia* mediante pirólisis lenta. Además, se recalcó que mediante ese proceso se obtiene un mejor rendimiento de biochar. Al mismo tiempo, diversos estudios ya han analizado la influencia que tiene las condiciones de pirólisis (velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de residencia, tamaño de partícula) en las características del biochar generado [40,50,51,53,54,60–62].

1.2 Planteamiento del problema

En respuesta a las crecientes demandas de energía y alimentos frente a un elevado crecimiento poblacional, existe la necesidad de expandir la frontera agrícola y usar combustibles fósiles para suplir dichas demandas [45]. El problema con el aumento de las actividades agrícolas, a nivel mundial, es que se generan toneladas de residuos, los cuales no son tratados [9]. Por ejemplo, en India se estima la generación de alrededor de 500 millones de toneladas métricas de residuos por año [46]. En lo que se refiere al cultivo de caña guadua, los residuos sólidos se generan durante el proceso de aprovechamiento de sus culmos (tallos), sea en una plantación forestal comercial o agrícola [36]. Zamora [31] menciona que cosechar la caña guadua genera entre 2 y 4 toneladas de residuos por hectárea por año.

Como tal, los residuos que se dejan en las plantaciones se queman o sufren un proceso de descomposición. Esto conlleva la emisión de gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), hacia la atmósfera lo que conlleva a problemas ambientales [24]. Al respecto, Mohan et al. [46] considera que por

cada tonelada de biomasa que se quema se liberan 1460 kg de CO₂, 60 kg de monóxido de carbono (CO), 2 kg de dióxido de azufre (SO₂), y 199 kg de cenizas. Además, de que el carbono liberado no permanece en el suelo, evitando una mejora en su fertilidad.

No obstante, el biochar surge como una alternativa sostenible para la gestión de residuos generados por la actividad agrícola, que pueden ser convertidos por los métodos termoquímicos mencionados anteriormente. Es una solución que se le pueda dar a dichos residuos, teniendo en cuenta que el biochar es multifuncional, es decir además de mitigar los gases de efecto invernadero (secuestro de carbono) se puede usar para el mejoramiento de los cultivos agrícolas y otras aplicaciones [40,43,46–48].

1.3 Justificación de la investigación

El aprovechamiento de la biomasa puede ser visto desde tres puntos: 1) beneficios de renovabilidad, es decir la biomasa crece y se renueva a diferencia de los combustibles fósiles que son limitados; 2) beneficios ambientales, pues la biomasa “almacena” CO₂ y su combustión no aporta emisión del mismo a la atmósfera, así mismo reduce otros gases de efecto invernadero; y 3) beneficios sociopolíticos, dado que la biomasa es la materia prima que crece de manera local y puede reemplazar la necesidad de importar combustibles fósiles [4,63,64].

Por otro lado, en el país existe una desvalorización en el aprovechamiento de biomasa residual que se generan en el sector agro-industrial [65] sumado a los limitados estudios que se han realizado en este tema [62,66]. Es así que, *G. angustifolia* emerge como un recurso vegetal económico, sustentable y altamente disponible a nivel de país, con estudios existentes sobre aprovechamiento de su biomasa para la producción de biochar mediante procesos termoquímicos como la pirólisis y gasificación. Además, es imperante mencionar que las propiedades fisicoquímicas del biochar se ven influenciadas por las condiciones de pirólisis (velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de residencia, tamaño de partícula) que se emplean durante su producción [40,50,51,53,54,60–62]; por lo cual este debe ser analizado a detalle en búsqueda de futuras aplicaciones [9].

Por lo tanto, existe una oportunidad para la producción de biochar a partir de biomasa residual de *G. angustifolia*, a partir de un proceso termoquímico muy estudiado, en este

caso la pirólisis [45]. El resultado más evidente sería el aprovechamiento de estos residuos a nivel energético y agrícola. A lo que se suma, el uso potencial reportado que tiene el biochar en la agricultura, energía y ambiente [45].

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la temperatura y tiempo de residencia en las propiedades fisicoquímicas del biochar de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth obtenido mediante pirólisis lenta.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el secado natural de *G. angustifolia*.
- Caracterizar la biomasa residual de *G. angustifolia*.
- Producir biochar a partir de residuos de *G. angustifolia* mediante pirólisis lenta variando las condiciones experimentales: temperatura y tiempo de residencia.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del biochar de *G. angustifolia*.
- Analizar la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en las propiedades del biochar de *G. angustifolia*.

CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

2.1 Recolección de muestras de *Guadua angustifolia*

Se recolectó dos tipos de biomasa de *G. angustifolia*: culmos (cañas) maduros y secos (residuos sólidos).

Por un lado, las cañas maduras de 3 años se tomaron de un guadal ubicado en las inmediaciones de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, Sede Tena, Napo. Para ello, se cortó con un machete 3 guaduas maduras de un metro de altura y 10 cm de diámetro, se quitó los espinos y se cortó cada culmo a la mitad para formar dos piezas [41]. Las 6 piezas, en total, se depositaron debajo de Laboratorio de Investigación A (Laboratorio de Biomasa) para estudiar el secado natural [49,67] de la guadua.

Por otro lado, los residuos sólidos (5 cañas secas) de guadua fueron proporcionados por un aserradero ubicado en la localidad de Alto Tena, a 2,5 km de la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Estas guaduas tienen una madurez entre 4 y 6 años, diámetros de 8 y 11 cm, y son producto de desecho, dado que no sirven como material para construcción de estructuras por ser propensas a deformaciones. De igual manera, se almacenaron debajo del Laboratorio de Biomasa para posteriormente realizar ensayos de producción de biochar.

2.2 Estudio del secado natural de *Guadua angustifolia*

2.2.1 Pretratamiento de las muestras

De las seis piezas de guadua madura, se escogió tres piezas al azar. Por cada pieza, se cortaron tres muestras de 2x2 cm aproximadamente con una sierra [41,68], lo que dio un total de 9 muestras. Luego, cada muestra se identificó de la siguiente manera: X-Mx, siendo X la pieza usada (1, 2 o 3), y x es el número de muestra tomada de cada pieza. Se limpió cada muestra con un papel toalla humedecido con agua destilada para quitar restos de suciedad y musgos/líquenes adheridos a su superficie [60]. A continuación, sobre un fondo blanco se fotografió cada muestra con un celular Xiaomi Redmi Note 10 y se almacenó con el código previamente descrito y el día en que se

tomó la fotografía. Finalmente, se realizó un análisis de sólidos totales, humedad y sólidos volátiles por cada día (ejemplo: día 1, día 9, día 43, etc.), conforme se visualiza en la Tabla 4, desde el 22 de marzo hasta el 9 de junio de 2022.

Tabla 4. Cronograma de toma de muestras de *Guadua angustifolia* para análisis de secado natural.

Día de la semana																		
Actividad	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J
	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Tomar tres muestras de cada pieza de guadua		x	x	x	x			x		x		x			x			
Identificar las muestras y fotografiarlas		x	x	x	x			x		x		x			x			
Realizar análisis de Sólidos totales		x	x	x	x			x		x		x			x			
Realizar análisis de Sólidos volátiles		x						x		x					x			
Día de la semana																		
Actividad	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Tomar tres muestras de cada pieza de guadua	x			x							x			x				x
Identificar las muestras y fotografiarlas	x			x							x			x				x
Realizar análisis de Sólidos totales	x			x							x			x				x
Realizar análisis de Sólidos volátiles				x							x							x
Día de la semana																		
Actividad	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V
	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Tomar tres muestras de cada pieza de guadua				x				x							x			

2.2.2 Análisis de sólidos totales y humedad

El análisis de sólidos totales y humedad se adaptó de Sluiter et al. [69]. Previo a ese análisis, se realizó una preparación del material a utilizar. En primer lugar, se escogió 9 crisoles de 20 mL, se los lavó con suficiente agua, y se los introdujo en la estufa marca Thermo Scientific, Heratherm OGS60 a 105 °C por una hora. Una vez transcurrido ese tiempo, se los sacó con una pinza metálica y se colocaron en un desecador por 40 minutos para que se enfríen, hasta alcanzar la temperatura ambiente. Después de eso, se pesó cada crisol previamente etiquetado con el código descrito en la sección 2.2.1, en una balanza analítica marca RADWAG, AS 60/220.R2 y se registró el valor como peso 1.

Acto seguido, se tomó cada muestra de guadua y se depositó en el crisol correspondiente. Se pesó cada crisol y se registró el valor como peso 2. Después, con una pinza metálica se introdujo cada crisol en la estufa a 105 °C por 24 horas, según Manjunath et al. [68].

Cuando pasó las 24 horas, se sacó los crisoles con una pinza metálica y se los colocó en el desecador por 40 minutos para que se enfríen, hasta alcanzar la temperatura ambiente. A continuación, se pesó cada crisol y se registró el valor como peso 3. Se volvió a colocar los crisoles a la estufa por una hora más, se enfrió y pesó nuevamente. Así, se repitió ese proceso hasta obtener un peso constante. El peso constante es un cambio de $\pm 0,1 \%$ en el porcentaje de peso de sólidos totales tras una hora de secar o recalentar la muestra [69].

El porcentaje de sólidos totales, es decir la fracción sólida presente después de calentar la muestra a 105 °C hasta peso constante, se calculó mediante la Ecuación 2 adaptada de Manjunath et al. [68].

$$\text{Sólidos totales (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} * 100 \quad (2)$$

en donde:

W_1 es el peso 1 (peso del crisol vacío) en [g], W_2 es el peso 2 (peso del crisol más muestra húmeda) en [g], y W_3 es el peso 3 (peso del crisol más muestra seca) en [g]. Esto quiere decir que la diferencia entre W_3 y W_1 determina la masa de sólidos totales

en una muestra (masa seca), mientras que la resta entre W_2 y W_1 da la masa de muestra ocupada (masa húmeda).

El porcentaje de humedad, es decir el total de agua presente en una muestra, se determinó mediante la Ecuación 3 [68].

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} * 100 \quad (3)$$

en donde:

la diferencia entre W_2 y W_3 determina la masa de agua en una muestra, mientras que la resta entre W_2 y W_1 da la masa de muestra ocupada (masa húmeda).

También el porcentaje de humedad se pudo determinar mediante la Ecuación 4 [69].

$$\text{Humedad (\%)} = 100 - \% \text{ Sólidos totales} \quad (4)$$

Las muestras secas de guadua se usaron para realizar el análisis de sólidos volátiles [70].

2.2.3 Análisis de sólidos volátiles

Este análisis se basó en lo detallado en Sluiter et al. [71]. Primeramente, se colocó los crisoles con las muestras secas de guadua dentro de una mufla marca JP Selecta, 2200854. Se encendió y programó el equipo para una calcinación de las muestras a 550 °C por 4 horas [72]. Antes de sacar los crisoles de la mufla, se tomó en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1) Transcurrido el tiempo de calentamiento/calcinación, se apaga el equipo y se deja enfriar para no comprometer su integridad,
- 2) Se debe contar con un equipo de protección (gafas y guantes de calor) previo al momento de abrir la mufla y,
- 3) Con mucho cuidado se saca los crisoles con/sin tapas con una pinza metálica larga y se deposita en un desecador. Antes de cerrar por completo el desecador, se asegura de dejar medio abierto unos dos minutos para evitar que la tapa vuele por el calor de las muestras.

Tomando en cuenta lo anterior, se llevó a enfriar los crisoles hasta la temperatura ambiente en un desecador por 30 minutos. A continuación, se pesó cada crisol en una balanza analítica y se registró el valor como peso 4 (peso del crisol más cenizas).

Acto seguido, se volvió a colocar los crisoles en la mufla para otra calcinación a 550 °C por una hora, se enfrió y pesó nuevamente, siguiendo las recomendaciones mencionadas arriba. Así, se repitió este proceso hasta obtener un peso constante. El peso constante se refiere al cambio en el peso del crisol, en menos de $\pm 0,3$ mg (0,0003 g), tras una hora de recalentar o re-calcinar una muestra [71].

El porcentaje de sólidos volátiles se calculó mediante la Ecuación 5 adaptada de Pham Minh et al. [72] y Birwatkar et al. [73].

$$\text{Sólidos volátiles (\%)} = \frac{(W_3 - W_1) - (W_4 - W_1)}{W_2 - W_1} * 100 \quad (5)$$

en donde:

W_4 es el peso 4 (peso del crisol más cenizas) en [g]. La diferencia entre W_4 y W_1 determina la masa de cenizas de una muestra. Y el numerador de la ecuación resta la fracción inorgánica de la muestra seca para obtener la parte orgánica o volátil de una muestra.

2.3 Caracterización de biomasa residual de *Guadua angustifolia*

La caracterización de biomasa residual de *G. angustifolia* se hizo mediante un análisis proximal. En el Análisis proximal se evaluó lo siguiente [49,68,74,75]:

- Contenido de humedad
- Contenido de materia volátil
- Contenido de cenizas
- Contenido de Carbono fijo

2.3.1 Pretratamiento de las muestras

Este apartado fue similar al detallado en la sección 2.2.1. Se cortó los residuos de *G. angustifolia* a la mitad para facilitar el corte de trozos más pequeños [41,60]. Se hizo

cortes de un tamaño aproximado de 2x2 cm [41,68]. Se los lavó con suficiente agua destilada para quitar restos de suciedad y partículas [60], y se quitó el exceso de humedad con papel toalla. Enseguida, se llevó a secar al aire libre [49,67] por una hora de lado y lado. Esto se realizó antes de hacer el ensayo de Determinación de humedad.

2.3.2 Contenido de humedad

La determinación de humedad se realizó según lo detallado en la sección 2.2.2, con la única diferencia de que este análisis se hizo por triplicado (3 muestras en total). Las muestras secas se almacenaron en un desecador hasta ocuparlos para efectuar los siguientes análisis [69].

2.3.3 Contenido de materia volátil

Previo a hacer este análisis, se hizo un acondicionamiento del material a utilizar adaptado de Pham Minh et al. [72]. Se lavó 3 crisoles y sus tapas, y se los introdujo en la mufla a calentar a 750 °C por 6 minutos [68]. Tomando en cuenta las recomendaciones detalladas en la sección 2.2.3, se sacó los crisoles y se enfrió hasta temperatura ambiente en un desecador por 30 minutos. A continuación, se etiquetó cada crisol con el siguiente código: MV-X siendo X el número de muestra, se pesó cada crisol en una balanza analítica y se registró el valor como peso 1.

Para el análisis, se tomó 3 muestras secas de residuos de guadua y se depositó en cada crisol. Se pesó cada crisol con la muestra tapado, y se registró el valor como peso 2. Enseguida, se llevó los crisoles a calentar en la mufla por 600 °C por seis minutos; y acto seguido, se elevó la temperatura a 750 °C y se mantuvo por otros seis minutos [68]. Pasado ese tiempo, se llevó a enfriar los crisoles en un desecador por 30 minutos, atendiendo a las recomendaciones de la sección 2.2.3. Finalmente, se pesó los crisoles y se registró el valor como peso 3.

El porcentaje de material volátil se determinó mediante la Ecuación 6 [72].

$$\text{Materia volátil (\%)} = \frac{m_2 - m_3 - m_4}{m_2 - m_1 - m_4} * 100 \quad (6)$$

en donde:

m_1 es el peso 1 (peso del crisol más tapa vacío) en [g], m_2 es el peso 2 (peso del crisol más muestra más tapa) en [g], m_3 es el peso 3 (peso del crisol más residuo más tapa) en [g], y m_4 es igual a 0 para muestras secas. La diferencia entre W_2 y W_3 determina la masa de materia volátil en una muestra, mientras que la resta entre W_2 y W_1 es la masa de muestra seca usada.

2.3.4 Contenido de cenizas

Previo a hacer este análisis, se hizo un acondicionamiento del material a utilizar adaptado de Sluiter et al. [71]. Se lavó 3 crisoles, y se los introdujo en la mufla a calentar a 550 °C por 1 hora [72]. Pasado ese tiempo, se llevó a enfriar los crisoles en un desecador por 30 minutos, siguiendo las recomendaciones detalladas en la sección 2.2.3. A continuación, se etiquetó cada crisol con el siguiente código: Ash-X siendo X el número de muestra, se pesó cada crisol en una balanza analítica y se registró el valor como peso 1.

Para el análisis, se tomó 3 muestras secas de residuos de guadua y se depositó en cada crisol. Se pesó cada crisol con muestra, y se registró el valor como peso 2. Enseguida, se llevó los crisoles a calcinar en la mufla por 550 °C por 4 horas. Pasado ese tiempo, se llevó a enfriar los crisoles en un desecador por 30 minutos, siguiendo las recomendaciones detalladas en la sección 2.2.3. Finalmente, se pesó los crisoles y se registró el valor como peso 3.

Se volvió a colocar los crisoles en la mufla para una calcinación a 550 °C por una hora, se enfrió y pesó nuevamente, tomando en cuenta las recomendaciones de la sección 2.2.3. Así, se repitió ese proceso hasta obtener un peso constante. El peso constante es el cambio en el peso del crisol, en menos de $\pm 0,3$ mg (0,0003 g), tras una hora de recalentar o re-calcinar una muestra [71].

El porcentaje de cenizas se calculó basado en la Ecuación 7 [73]:

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} * 100 \quad (7)$$

en donde:

W_1 es el peso 1 (peso del crisol vacío) en [g], W_2 es el peso 2 (peso del crisol más muestra) en [g], y W_3 es el peso 3 (peso del crisol más cenizas) en [g]. Esto quiere decir que la diferencia entre W_3 y W_1 determina la masa de cenizas en una muestra, mientras que la resta entre W_2 y W_1 da la masa seca de muestra ocupada.

2.3.5 Contenido de Carbono fijo

El contenido de carbono fijo se determina al restar de 100 la sumatoria de cenizas, volátiles y contenido de humedad basado en la Ecuación 8 [73].

$$\text{Carbono fijo (\%)} = 100 - (\% \text{Humedad} + \% \text{Cenizas} + \% \text{Materia volátil}) \quad (8)$$

2.4 Ensayos de producción de biochar de residuos de *Guadua angustifolia*

2.4.1 Preparación de materiales y muestras

Se tomó y preparó las muestras para los ensayos de producción de biochar conforme se describió en el apartado 2.3.1. Además, se preparó los materiales a usar (crisoles y tapas) a 105 °C por una hora. Se identificó las muestras y los crisoles y tapas con el siguiente código: BG-MX, siendo BG las siglas de biochar de guadua y X el número de muestra usado. Se pesó los crisoles vacíos y los crisoles con las muestras húmedas, y se registró como peso 1 y peso 2 respectivamente.

Luego, se secó los crisoles con muestras a 105° C por 24 horas más repeticiones hasta tener peso constante, de acuerdo al procedimiento detallado en el apartado 2.2.1. Se pesó y se registró como peso 3. La diferencia entre el peso 3 y 1 arrojó el valor en [g] de guadua seca.

2.4.2 Ensayos de producción de biochar

En los ensayos de producción de biochar de *G. angustifolia* se trabajó con dos variables experimentales: temperatura y tiempo de residencia. Cada ensayo se realizó por triplicado. Una vez que se secó las muestras de *G. angustifolia*, se tapó 3 crisoles y se colocó en la mufla para una pirólisis lenta [8] a una velocidad de calentamiento de 20°C/min [64]. Esto hasta alcanzar una temperatura final de 450 °C y se mantuvo por un tiempo de residencia de 30 minutos. De igual manera, se hizo lo mismo para una

temperatura final de 450 °C y un tiempo de residencia de una hora. Es así que, se realizó pirólisis lenta de *G. angustifolia* con temperaturas finales de 450, 550, 600, 700 y 800 °C a un tiempo de residencia de 30 minutos y una hora [60]. El total de ensayos fue de 10. Una vez alcanzado el tiempo requerido en cada ensayo, se llevó a enfriar los crisoles en un desecador por 35 minutos, según las recomendaciones detalladas en la sección 2.2.3 previo a sacar los crisoles de la mufla. Posteriormente, se pesó el crisol con el biochar sin tapa y se registró como peso 4. La diferencia entre el peso 4 y peso 1 determinó la cantidad de biochar en [g] producido.

Se determinó el rendimiento de biochar producido por cada ensayo de acuerdo a la Ecuación 9 [70]:

$$\text{Rendimiento biochar } \left(\% \frac{p}{p} \right) = \frac{W_c}{W_w} \times 100 \quad (9)$$

en donde,

W_c es el peso del biochar obtenido en [g] y W_w es el peso en seco de biomasa residual de *G. angustifolia* en [g].

Además, se calculó la pérdida de biomasa haciendo uso de la Ecuación 10:

$$\text{Pérdida de biomasa } (\%) = 100 - \% \text{ Rendimiento de biochar} \quad (10)$$

2.5 Caracterización fisicoquímica del biochar de *Guadua angustifolia*

Antes de realizar la caracterización fisicoquímica con excepción del análisis por microscopía electrónica de barrido, el biochar generado se trituyó de forma manual en un mortero con un pistilo [60]. El polvo de biochar se pasó por un tamiz malla N° 60 para tener un tamaño de partícula homogéneo (250 µm o 0,25 mm) [58] y se almacenó en fundas ziploc etiquetadas [76].

La caracterización fisicoquímica permite determinar propiedades físicas y químicas del biochar como: la porosidad, su morfología y estructura, elementos en la superficie, la química de grupos funcionales, el pH y la conductividad eléctrica.

2.5.1 Análisis de morfología de biochar

La morfología de la superficie del biochar se realiza por medio de Microscopia electrónica de barrido (SEM). Este análisis se realizó en el Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander. Se seleccionó una muestra por cada tratamiento para un total de 10 muestras. Las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón. Se tomó las imágenes con un Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 con las siguientes características: Alto vacío, Voltaje de aceleración de 30 kV, y Detector para imágenes: Electrones secundarios (SE): Everhart Thornley detector ETD y Electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD (Información proporcionada por la institución donde se realizó el análisis).

2.5.2 Análisis químico de biochar

En conjunto con el análisis de morfología de biochar, se realizó un análisis químico de las muestras por EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy o Espectroscopia de Dispersión de Energía). El análisis se realizó con las siguientes características: Voltaje de aceleración 30 Kv, Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn K α) y Software EDX Genesis que provee información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

2.5.3 Análisis BET (Área superficial específica)

El área superficial específica del biochar se determinó mediante el método BET (Brunauer-Emmelt-Teller). Para el análisis, se seleccionó 4 muestras de biochar producidos a 600 °C y 800 °C por una hora y 30 minutos. Esto basado en las características de estos biochar que se obtuvo al procesar las imágenes por SEM. Los análisis de fisisorción de nitrógeno fueron realizados con un equipo Quantachrome Instruments Nova4200e. Antes de realizar el análisis, las muestras fueron secadas a 110 °C durante la noche y desgasificadas a 250 °C por 15 horas.

Este análisis se realizó por colaboración con la Escuela Politécnica Nacional, Sede Quito, Pichincha.

2.5.4 Química de grupos funcionales

Se obtuvo los grupos funcionales presentes en la superficie del biochar mediante un análisis por Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR). Este análisis se realizó por colaboración con la Universidad Investigación de Tecnología Experimental Yachay, Sede San Miguel de Urcuquí, Imbabura. Para el análisis, se seleccionó 4 muestras de biochar producidos a 600 °C y 800 °C por una hora y 30 minutos. Esto basado en las características de estos biochar que se obtuvo al procesar las imágenes por SEM.

2.5.5 Análisis del pH y conductividad eléctrica

Se mezcló 0,5 g de biochar con 20 mL de agua desionizada [77] en un vaso de precipitación de 25 mL codificado de esta manera T-30m (biochar producido en 30 minutos) o T-1h (biochar producido en una hora), en donde T representa la temperatura a la que se produjo el biochar (450, 550, 600, 700 y 800 °C). Se mezcló con una varilla de agitación, se introdujo un agitador magnético y se llevó a agitar en una plancha de calentamiento marca Fisherbrand™ variando las condiciones reportadas en [41], es decir a 100 rpm y 30 °C por una hora. Pasado ese tiempo, se dejó reposar la mezcla por unos 30 minutos, y se filtró con un equipo de filtración al vacío [77,78]. El líquido resultante se depositó en otro vaso de precipitación de 25 mL codificado y se midió el pH y la conductividad eléctrica con un medidor de pH y conductividad marca Thermo Scientific. Este análisis se realizó por duplicado.

2.6 Análisis estadístico

Se procesó y trató los datos de los análisis involucrados en el estudio de secado natural y análisis proximal de *G. angustifolia*, ensayos de producción de biochar y análisis de pH y conductividad mediante estadística descriptiva, es decir se calculó y reportó el promedio y desviación estándar [52], y se elaboró las gráficas con el programa Microsoft® Excel® LTSC MSO 2021.

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

3.1 Secado natural de *Guadua angustifolia*

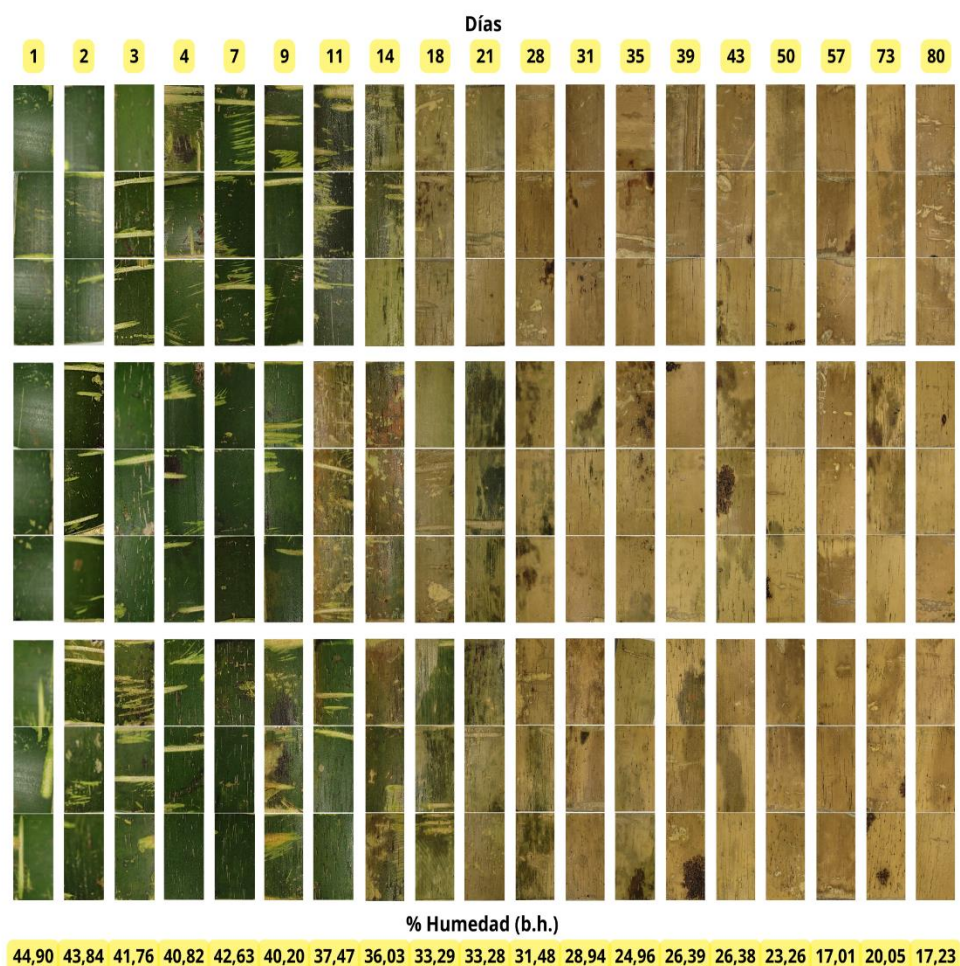


Figura 3. Variación de color en *Guadua angustifolia* durante varios días de secado.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

Las piezas de *G. angustifolia* madura se secaron por 3 meses aproximadamente, y se hizo un análisis de la variación de su color conforme varios días de secado al natural (desde el día 1 al día 80). Como se observa en la Figura 3, entre los días 11 y 28 *G. angustifolia* comienza cambiar desde un color verde intenso presente en los primeros días del corte hacia una tonalidad café/amarilla con presencia de pequeñas manchas verdes opacas. A partir del día 31, *G. angustifolia* toma un color amarillo intenso con ciertas manchas verdes/negras difusas indicando que se ha secado.

Lo anterior, se puede corroborar con la curva de humedad de *G. angustifolia* que se presenta en la Figura 4. La humedad de *G. angustifolia* desciende desde 44,90% en el día 1 hasta 17,23% en el día 80. En los días 1 a 9, hay valores altos de humedad en *G. angustifolia* relacionándose al color verde que presenta en ese momento. En el periodo de día 11 al día 28, hay un descenso de la humedad que se relaciona con el cambio de color de verde a amarillo en *G. angustifolia*. De allí en adelante, los valores de humedad presentan ligeras variaciones en los días 35 y 73, pero que igual tienden a disminuir si se comparan con el valor registrado en el día 31 (28,94%).

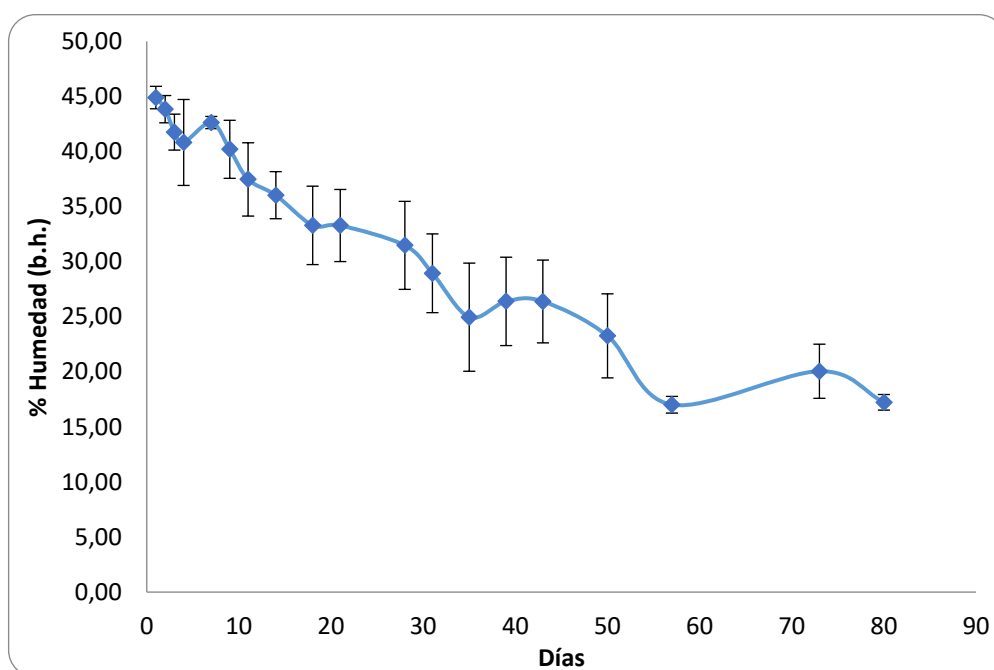


Figura 4. Curva de humedad de *Guadua angustifolia* Kunth.
Realizado por: Puma, Luis, 2023.

De igual manera, en la Figura 5 se presenta la curva de sólidos totales y sólidos volátiles de *G. angustifolia*. Los sólidos totales corresponden a la parte sólida que se mantiene después de calentar una muestra a 105 °C hasta peso constante. Mientras la humedad de *G. angustifolia* desciende, el porcentaje de sólidos totales aumenta desde 55,10% en el día 1 hasta 82,77% en el día 80. En los primeros días, hay un porcentaje moderadamente alto de sólidos totales en *G. angustifolia* que se relaciona al porcentaje alto de humedad que presenta en ese momento. A partir del día 9, hay un aumento significativo del porcentaje de sólidos totales que se relaciona con el cambio de color de verde a amarillo en *G. angustifolia*. De igual manera, los porcentajes de sólidos totales presentan ligeras variaciones en los días 35 y 73, pero que igual tienden a aumentar si se comparan con el valor registrado en el día 31 (71,06%).

En el caso de sólidos volátiles, se visualiza en la Figura 5 que se relaciona con la tendencia que sigue los sólidos totales en *G. angustifolia*. Esto quiere decir que, si aumenta el porcentaje de sólidos totales, también lo hará el porcentaje de sólidos volátiles. Así, para el día 73 se reporta un porcentaje de 75,59%.

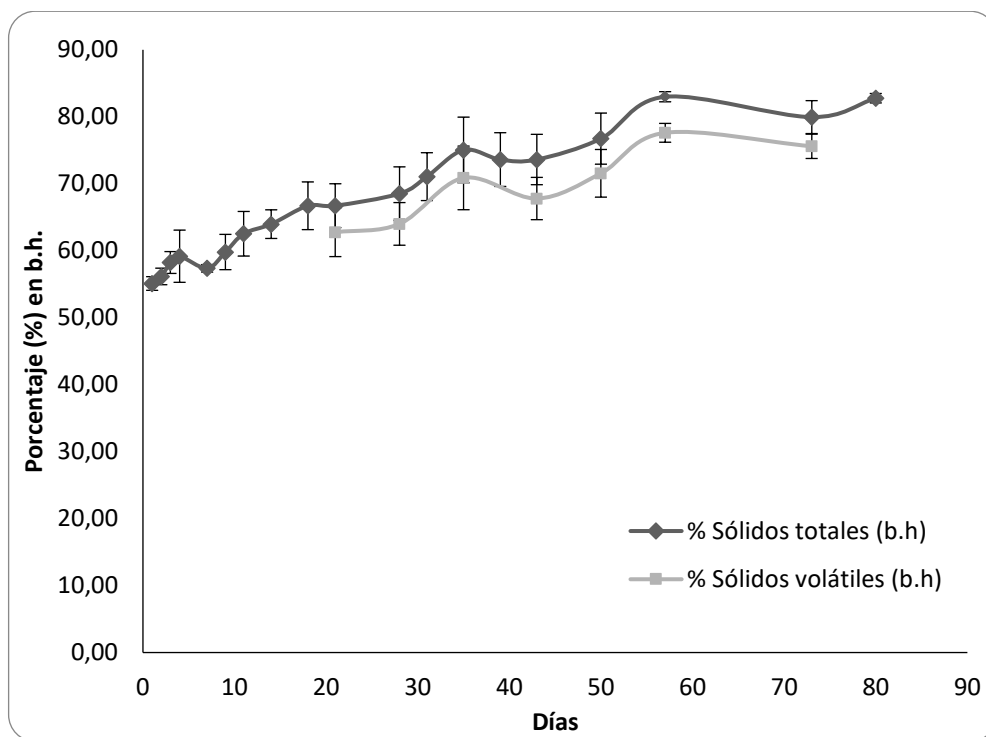


Figura 5. Curva de sólidos totales y sólidos volátiles de *Guadua angustifolia* Kunth.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

3.2 Caracterización de biomasa residual de *Guadua angustifolia*

El análisis proximal de los residuos de *G. angustifolia* se presenta en la Tabla 5. Se puede observar que estos residuos contienen un 13,03% de humedad, 77,76% de materia volátil, 3,63% de cenizas y 16,38% de carbono fijo.

Tabla 5. Parámetros físicos de los residuos de *G. angustifolia*.

Parámetro	Contenido (%)
Humedad	13,03 ± 0,69
Materia volátil	77,76 ± 2,87
Cenizas	3,63 ± 1,03
Carbono fijo*	16,38 ± 3,38

*Los porcentajes de materia volátil y cenizas se pasaron de base seca a base húmeda para hacer el cálculo del contenido de carbono fijo.

Realizado por: Puma, Luis, 2023

3.3 Producción de biochar de residuos de *Guadua angustifolia*

El biochar de residuos de *G. angustifolia* se midió en términos de rendimiento y pérdida de biomasa. Se obtuvo un mayor rendimiento de biochar a una temperatura de 450 °C en los dos tiempos de residencia, es decir 36,18% para un tiempo de 30 minutos y 34,56% para un tiempo de una hora. De acuerdo a la Figura 6, el rendimiento del biochar disminuye conforme aumenta la temperatura de pirólisis a la par que aumenta la pérdida de biomasa. La pérdida de biomasa en *G. angustifolia* es mayor conforme se somete a temperaturas de 700°C y 800 °C. Esto ocasiona que el rendimiento del biochar a esas temperaturas sea menor. No existe un cambio significativo en el rendimiento y la pérdida de biomasa en el biochar producido a una hora versus el producido a treinta minutos, a excepción de una ligera variación de dichos parámetros en los biochar producidos a una temperatura de 700 °C.

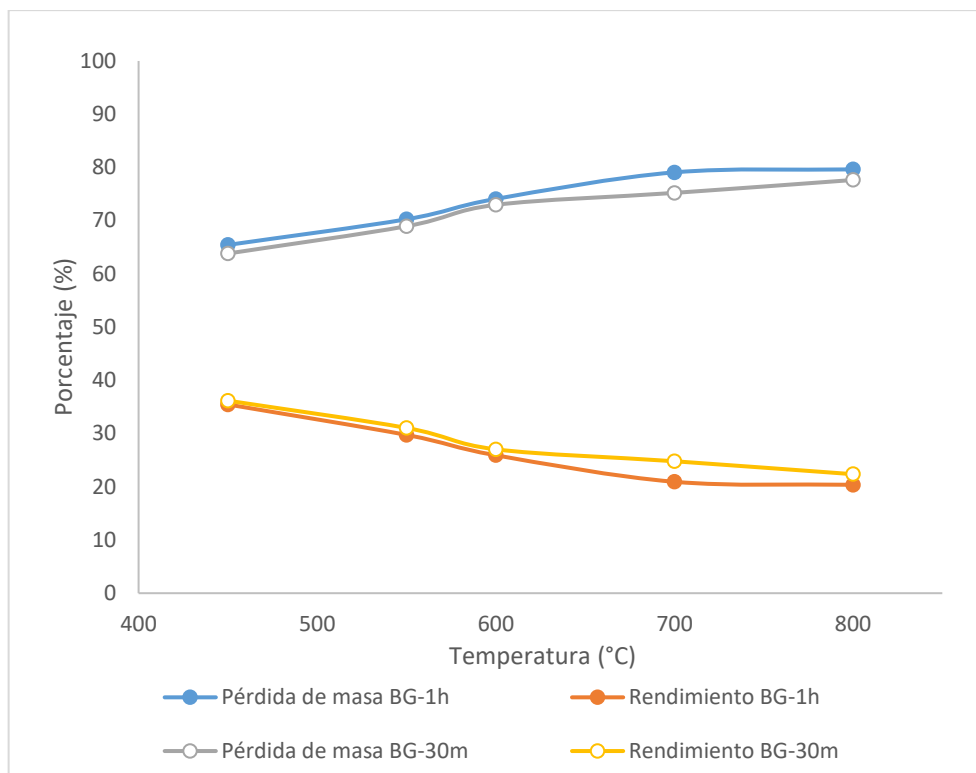


Figura 6. Variación del rendimiento y pérdida de biomasa en los biochar de residuos de *G. angustifolia* producidos a diferentes condiciones de pirólisis. BG-1h: biochar de *G. angustifolia* producido a una hora de pirólisis. BG-30m: biochar de *G. angustifolia* producido a 30 minutos de pirólisis.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

3.4 Caracterización fisicoquímica del biochar de residuos de *Guadua angustifolia*

3.4.1 Análisis morfológico de biochar de *G. angustifolia*

Las imágenes por microscopía electrónica de barrido de la superficie y morfología de los biochar de *G. angustifolia* producidos a diferentes condiciones de temperatura y tiempo de pirólisis se observan en las Figuras 7 y 9.

En el caso de los biochar producidos a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de 30 minutos se puede comentar lo siguiente. A los 450 °C, se visualiza una superficie agrietada y plana con posible presencia de poros visibles (Figura 7A). A 550 °C, se evidencia la pared celular y una superficie irregular con el desarrollo de poros bien definidos (macroporos) y presencia de minerales dispersos (Figura 7B). Un macroporo en este biochar se indica en la Figura 8A. A los 600 °C, se observa una estructura altamente porosa, posiblemente con macroporos, irregular, agrietada y se

visualiza fibras (Figura 7C). A los 700 °C se presenta una superficie agrietada e irregular sin presencia de poros visibles (Figura 7D). A los 800 °C, se muestra una superficie ligeramente porosa con presencia de macroporos y restos de cenizas (Figura 7E). Se distinguen macroporos de 1944 a 3400 nanómetros en este biochar (Figura 8B-C).

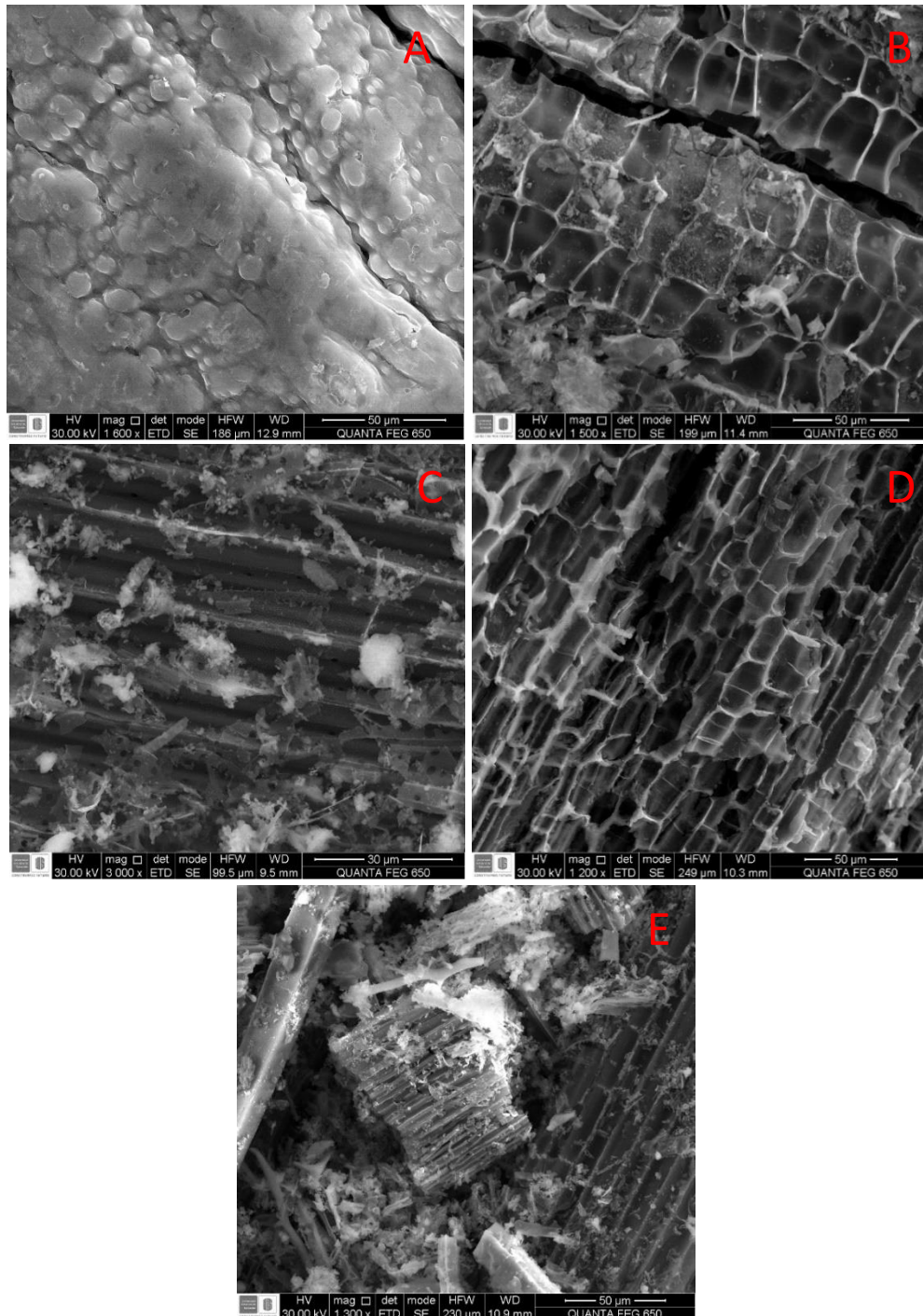


Figura 7. Micrografías por SEM de los biochar de *G. angustifolia* producidos a A) 450 °C, B) 550 °C, C) 600 °C, D) 700 °C y E) 800 °C a un tiempo de 30 minutos.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

En lo que respecta a los biochar producidos a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de 1 hora se encontró lo siguiente. A los 450 °C, se evidencia una superficie suave, con ligeras alteraciones en la pared celular y una estructura no porosa o sin poros visibles (Figura 9A). A 550 °C, se presenta una superficie agrietada con daño parcial de la pared celular con el desarrollo de 2 poros bien definidos (macroporos), uno de 54 400 nm y el otro de 77 790 nm (Figura 9B). A los 600 °C, se observa una estructura altamente porosa con la pared celular visible y con macroporos bien definidos (Figura 9C). Los macroporos en este biochar van desde 988.5 hasta 6324 nm, según la Figura 8D-E. A los 700 °C se muestra una superficie desordenada y agrietada con presencia de fibras y cenizas, sin presencia visible de poros (Figura 9D). A los 800 °C se visualiza una superficie suave con daño parcial de la pared celular producto de la descomposición térmica, sin presencia visible de poros (Figura 9E).

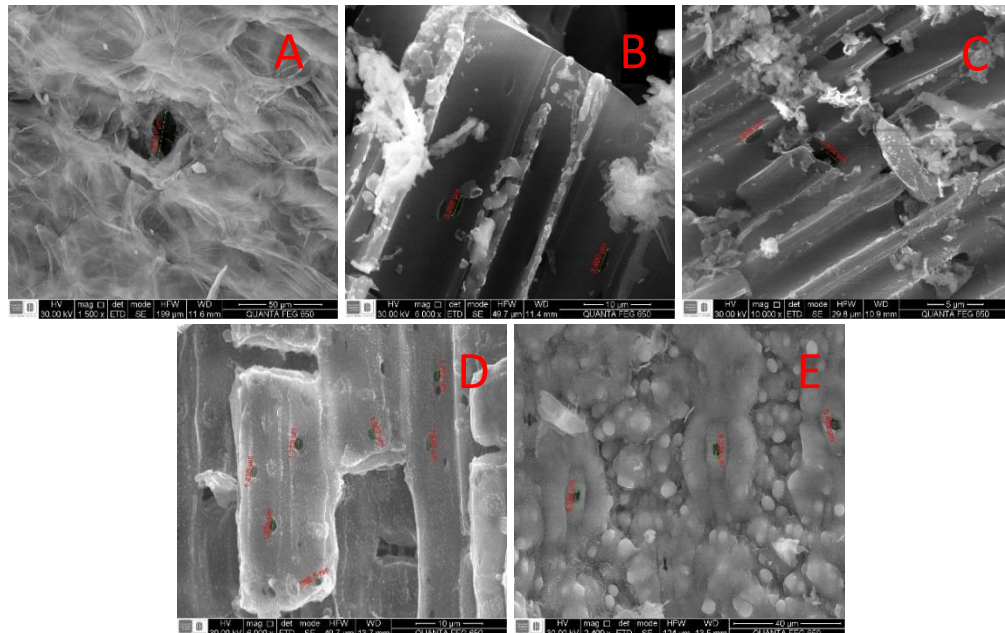


Figura 8. Presencia de macroporos en el biochar de *G. angustifolia* producido a: A) 550 °C, y B-C) 800 °C a un tiempo de 30 minutos, y D-E) 600 °C a un tiempo de una hora.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

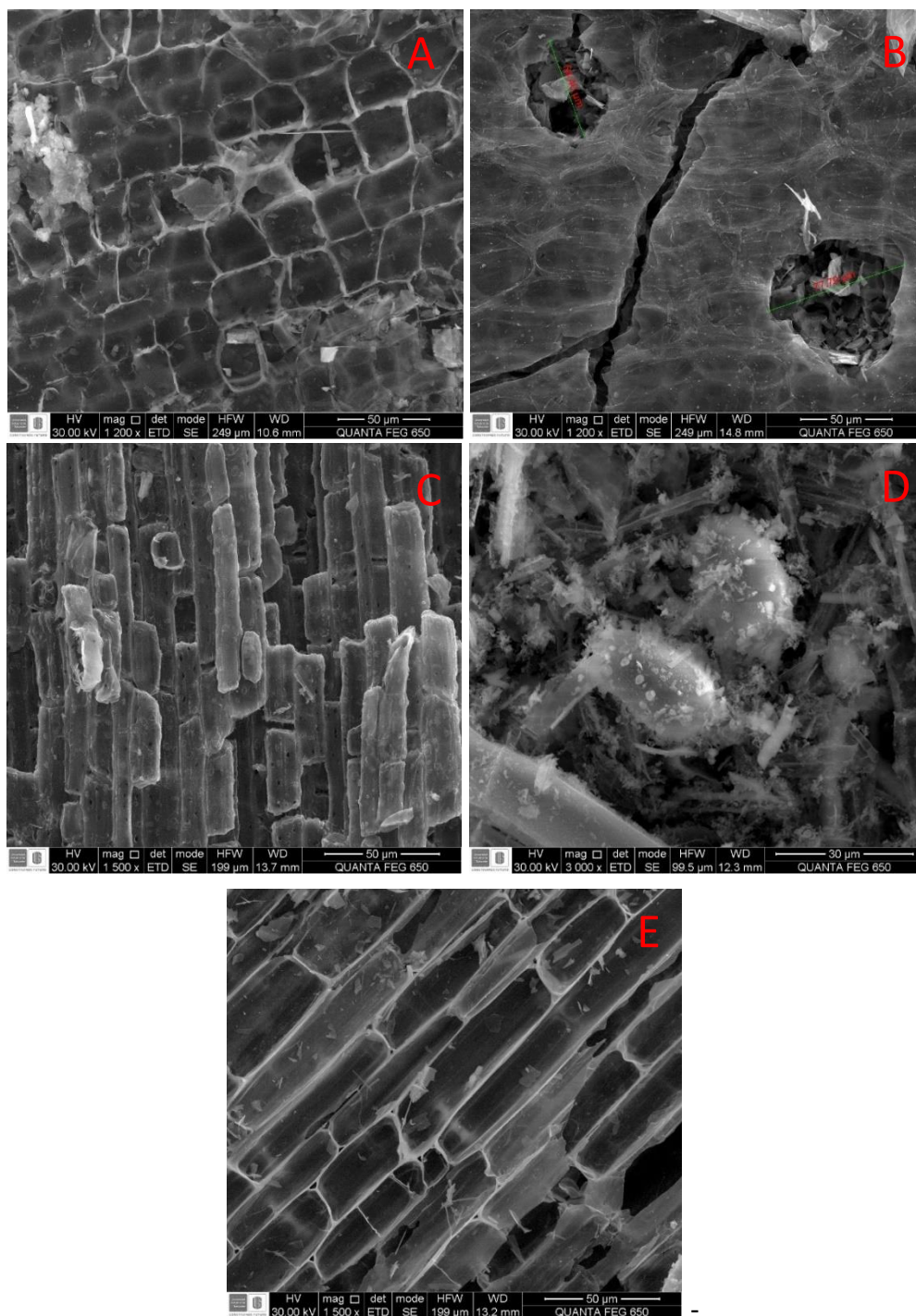


Figura 9. Micrograffías por SEM de los biochar de *G. angustifolia* producidos a A) 450 °C, B) 550 °C, C) 600 °C, D) 700 °C y E) 800 °C a un tiempo de 1 hora.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

3.4.2 Análisis químico elemental de biochar de *G. angustifolia*

En cuanto al análisis químico de las muestras de biochar de *G. angustifolia* por EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy o Espectroscopía de Dispersión de Energía) se puede acotar lo siguiente.

Por un lado, en la Figura 10 se puede observar la variación en el contenido (porcentaje en peso) de los elementos presentes en la superficie de los biochar producidos a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de 30 minutos. Los elementos que se encontraron fueron: carbono, oxígeno, silicio, potasio, azufre, calcio y sodio. Se puede acotar que el porcentaje en peso del carbono es variable en todos los biochar, pues no se observa alguna tendencia. El oxígeno está presente en una composición significativa en todos los biochar sobre todo a temperaturas de 450 y 550 °C (47,23% y 43,2%, respectivamente). Se evidencia un mayor porcentaje en peso de silicio en el biochar producido a 550 y 700 °C (46,07% y 45,72%, respectivamente) mientras que se obtuvo una mayor composición en peso de potasio (32,26%) a 600 °C. En todos los biochar se reporta presencia de silicio, potasio y trazas de azufre, mientras que trazas de calcio y sodio aparecen desde los 550 °C en adelante.

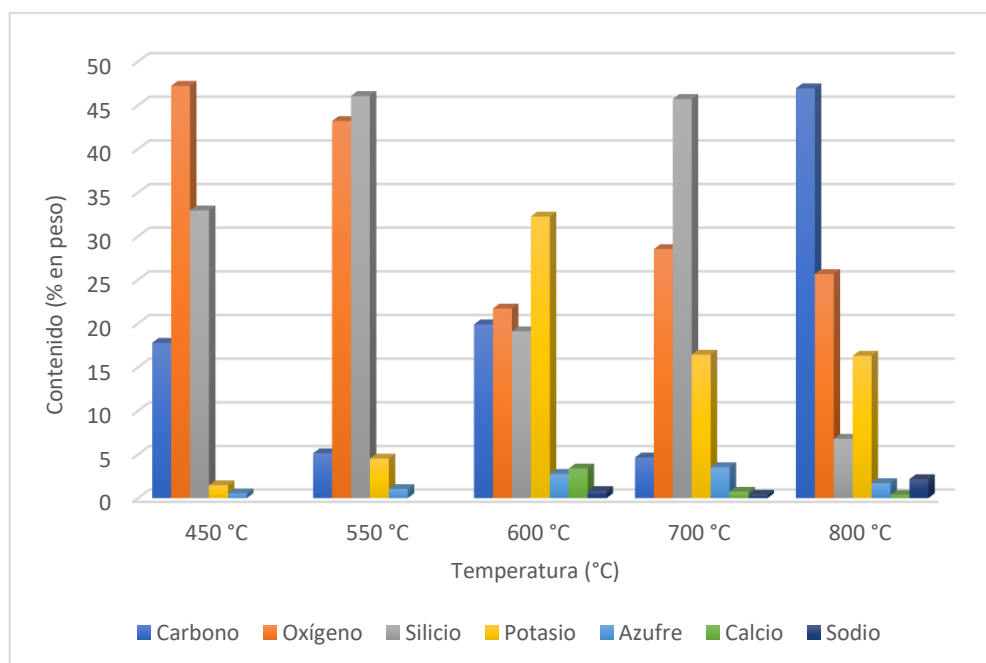


Figura 10. Variación en la composición elemental de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia de 30 minutos.
Realizado por: Puma, Luis, 2023.

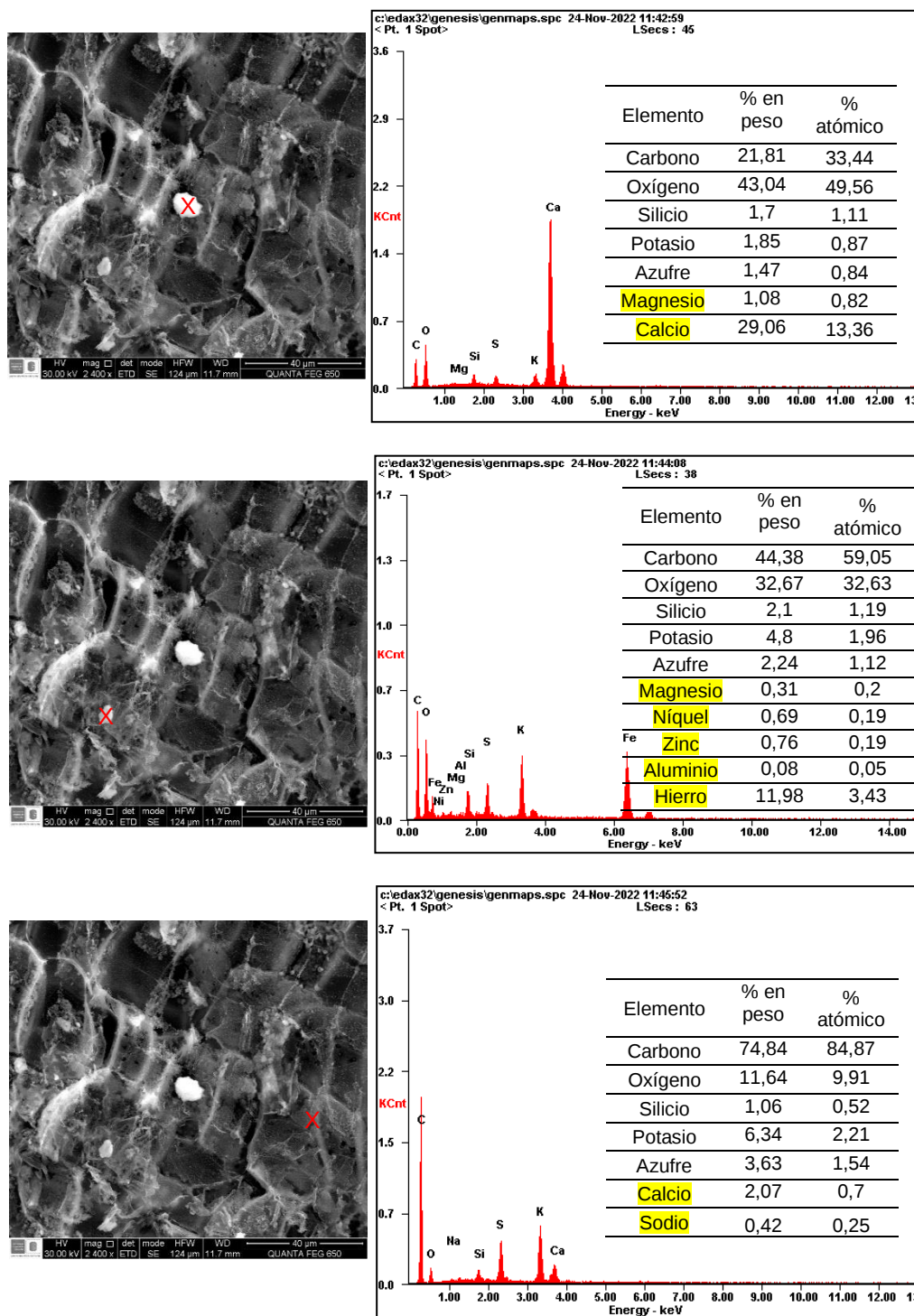


Figura 11. Espectros de elementos presentes en puntos articulados del biochar de *G. angustifolia* obtenido por pirólisis a 550 °C y 30 minutos.
Realizado por: Puma, Luis, 2023.

Como dato adicional, además de encontrar los elementos antes descritos en la Figura 10 a una temperatura de 550 °C, se reporta la presencia de trazas de otros minerales como magnesio, níquel, zinc, hierro y aluminio en distintos puntos de la superficie de

ese biochar. Esto se evidencia según los espectros de esos puntos que se muestran en la Figura 11. Adicional a los espectros, se añade también la composición elemental en porcentaje en peso y porcentaje atómico de los minerales encontrados, los cuales están resaltados en color amarillo.

Por otro lado, en la Figura 12 se puede visualizar el cambio en el contenido (porcentaje en peso) de los elementos presentes en la superficie de los biochar producidos a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de una hora. Se encontró elementos como: carbono, oxígeno, silicio, potasio y azufre. Al analizar la Figura 12 se puede ver un descenso en el porcentaje en peso del carbono en el biochar conforme la temperatura aumenta, el cual pasa de 47,27% a 450 °C hasta un 6,39% a 700 °C. El porcentaje en peso del oxígeno y silicio aumenta, así como el porcentaje en peso del potasio. El valor mayor de oxígeno (44,92%) corresponde al biochar de 700°C mientras que el valor más alto de silicio (51,06%) pertenece al biochar de 600 °C. Se reporta trazas de azufre (2,29%) sólo en el biochar producido a 700 °C. El mineral más abundante es el silicio seguido del potasio en todos los biochar. No hay reporte de la composición elemental para el biochar producido a 800 °C.

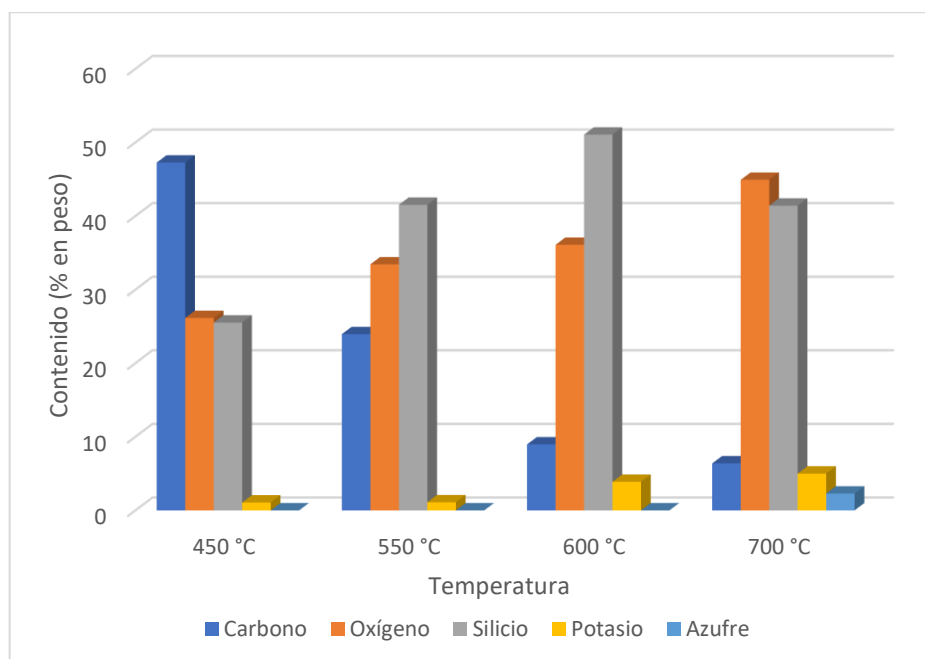


Figura 12. Variación en la composición elemental de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia de 1 hora.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

3.4.3 Análisis BET en biochar de *G. angustifolia*

En la Tabla 6, se recogen las áreas superficiales específicas para 3 muestras de biochar que se produjeron a 600 °C y 30 minutos, y 800 °C por un lapso de 30 minutos y una hora. Se evidencia que el área superficial específica aumenta cuando la temperatura sube de 600 °C a 800 °C. Incluso a un mismo tiempo de residencia (30 minutos), se presente ese comportamiento.

Tabla 6. Área superficial específica de los biochar de *G. angustifolia* producidos a distintas condiciones de pirólisis lenta.

Muestra de biochar	Área superficial específica ($\frac{m^2}{g}$)
BG 600 °C-30m	309
BG 800 °C-30m	501
BG 800 °C-1h	597

Realizado por: Puma, Luis, 2023

3.4.4 Análisis de grupos funcionales en biochar de *G. angustifolia*

En la Figura 13, se puede observar a detalle el análisis de Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) en los biochar de *G. angustifolia* producidos a 600 °C y 800 °C a 30 min y una hora de pirólisis. Se observa que el espectro de BG 600 °C-30 min no evidencia una intensidad fuerte en los picos de los grupos funcionales, por lo que se asemeja más a una línea recta. En caso del resto de los espectros, se visualiza una vibración débil casi imperceptible de grupos hidroxilo (OH) en el rango de 3095 a 3452 cm^{-1} en BG 600 °C-1h, que disminuye conforme aumenta la temperatura de pirólisis [79–81]. Además, se presenta un pico a 1580 cm^{-1} correspondiente a una vibración asimétrica de C=C aromáticos o grupos carbonilos (C=O) asociados a cetonas y quinonas conjugadas [80,82,83]. Por otro lado, los picos a 1116 cm^{-1} , 997 cm^{-1} y 1035 cm^{-1} correspondientes a BG 600°C- 1h, BG 800 °C-30m y BG 800 °C-1h, respectivamente, se atribuyen a estiramientos de grupos C-O-C (éter) presentes en la lignina, o a vibraciones de Si-O-Si [83–85]. Finalmente, en los picos registrados a 877 y 750 cm^{-1} para BG 600°C- 1h, y 779 cm^{-1} para BG 800 °C-30m y BG 800 °C-1h corresponden a vibraciones de deformación fuera de plano de grupos C-H aromáticos [82].

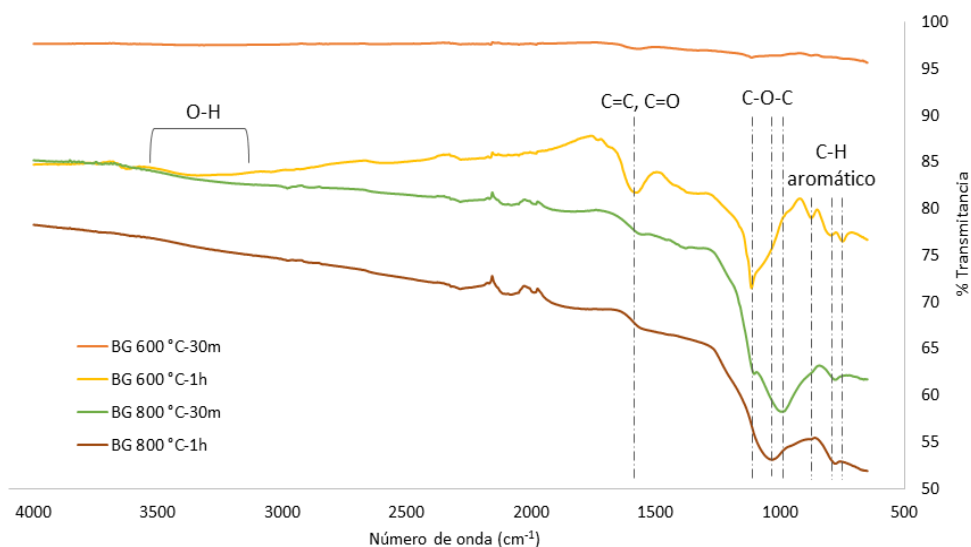


Figura 13. FT-IR de los biochar de *G. angustifolia* producidos a distintas condiciones de pirólisis lenta. BG 600 °C-30m: biochar de *G. angustifolia* producido a 600 °C y 30 minutos de pirólisis. BG 800 °C-30m: biochar de *G. angustifolia* producido a 800 °C y 30 minutos de pirólisis. BG 600 °C-1h: biochar de *G. angustifolia* producido a 600 °C y 1 hora de pirólisis. BG 800 °C-1h: biochar de *G. angustifolia* producido a 800 °C y 1 hora de pirólisis.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

3.4.5 pH y conductividad de biochar de *G. angustifolia*

En lo que respecta al pH de biochar de *G. angustifolia*, se visualiza en la Figura 14 una tendencia de subida conforme aumenta la temperatura a diferentes tiempos de pirólisis. El pH es alcalino con valores que oscilan desde 8,00 a 9,78. El valor más bajo de pH, es decir 8,00 corresponde al biochar producido a 450 °C y una hora mientras que el valor más alto, es decir 9,78 corresponde al biochar producido a 800 °C y una hora. Aunque también se puede ver que, a las temperaturas de 550, 600 y 800°C los valores de pH se asemejan independiente del tiempo de pirólisis.

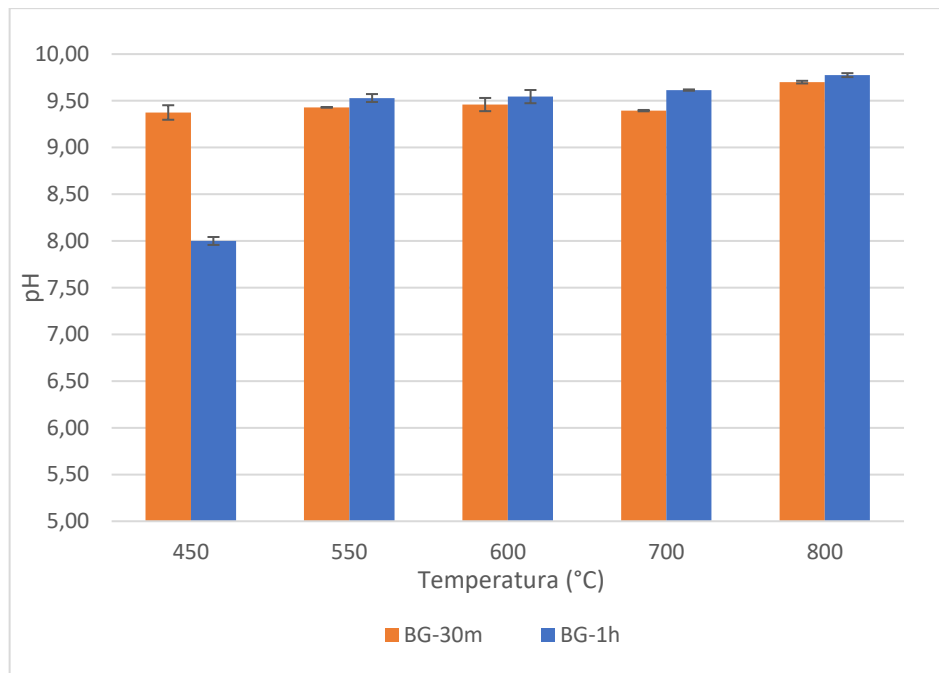


Figura 14. Valores de pH de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia. BG-1h: biochar de *G. angustifolia* producido a una hora de pirólisis. BG-30m: biochar de *G. angustifolia* producido a 30 minutos de pirólisis.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

Ahora, para el caso de la conductividad eléctrica de biochar de *G. angustifolia*, se visualiza en la Figura 15 una diferencia más marcada entre los biochar producidos a diferentes tiempos de pirólisis. Así mismo, como el pH la conductividad eléctrica tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura. El valor más bajo de conductividad, es decir 403 $\mu\text{S/cm}$ corresponde al biochar producido a 450 °C y 30 minutos mientras que el valor más alto, es decir 1754 $\mu\text{S/cm}$ corresponde al biochar producido a 800 °C y 30 minutos. La tendencia de aumento de conductividad eléctrica en biochar preparados a una hora es proporcional a la temperatura, a excepción del valor registrado a 800 °C (1352 $\mu\text{S/cm}$) que se asemeja al valor de 700 °C (1354 $\mu\text{S/cm}$). Para biochar producidos a 30 minutos, también se ve esa tendencia con una ligera variación en el valor registrado para la temperatura de 550 °C (939 $\mu\text{S/cm}$).

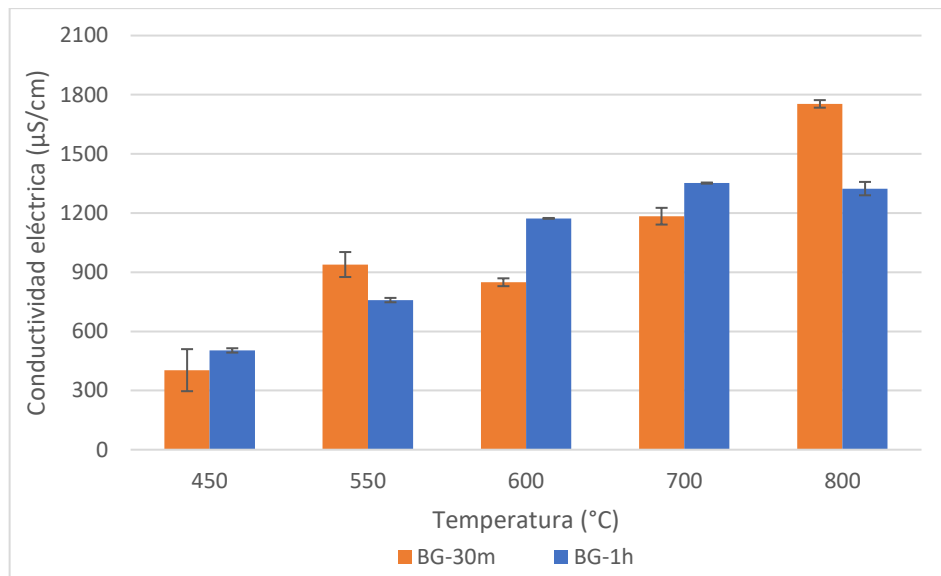


Figura 15. Valores de conductividad eléctrica de los biochar producidos por pirólisis a distintas temperaturas y tiempo de residencia. BG-1h: biochar de *G. angustifolia* producido a una hora de pirólisis. BG-30m: biochar de *G. angustifolia* producido a 30 minutos de pirólisis.

Realizado por: Puma, Luis, 2023.

CAPÍTULO IV: INTERPRETACIÓN, Y DISCUSIÓN

4.1 Secado natural de *Guadua angustifolia*

G. angustifolia es una especie de bambú valorada por sus múltiples usos en la construcción. Las personas que se dedican a este sector utilizan el color del culmo (tallo) como un indicador del estado de madurez [86]. A partir de eso, se puede diferenciar 4 etapas bien definidas en el ciclo de vida de esta planta: renuevo, juvenil, madura y seca [28].

En este estudio, a partir de la premisa anterior se estudió si el cambio del color de la guadua es indicativo de pérdida de humedad en la misma conforme un secado natural. Esto con el objetivo de determinar en qué tiempo una guadua madura podría ser utilizada con fines de aprovechamiento (producción de biochar), cuando esta pasa por un proceso de secado natural, sin requerimientos energéticos externos. Así, en la Figura 3 se observa una clara degradación del color de *G. angustifolia* durante varios días de secado. La distribución de colores en esa gráfica se puede asemejar con la paleta de colores para *G. angustifolia* desarrollada por Hernández et al. [86] mediante colorimetría. En el sentido que *G. angustifolia* pasa de un estado joven a uno sobre maduro con cambios significativos en el color del culmo en años, un patrón que se encontró en este estudio, pero en 3 meses de secado al natural. Al respecto, las guaduas utilizadas para este proceso de secado eran de un estado maduro (3 años de edad) por presentar líquenes en su superficie y elevada humedad [28], lo cual se valida por la curva de humedad realizada (Figura 4). El cambio de color puede ser explicado por la pérdida de agua, que induce un cambio en la estructura de la guadua [87].

Al final del análisis de secado natural, es decir en el día 80, *G. angustifolia* alcanzó un 17,23% de humedad y 82,77% de sólidos totales, y un 75,59% de sólidos volátiles (día 73). Las ligeras fluctuaciones en los parámetros antes mencionados durante el tiempo que duró el análisis (Figura 4 y 5) se deben a la incidencia de factores climáticos (radiación solar, precipitación, humedad del ambiente), de los que no se tuvo control al realizar este proceso de secado natural. Ahora bien, un alto porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles indican que *G. angustifolia* en un estado maduro es buen candidato para producir biochar. Por un lado, los sólidos totales corresponden a la fracción sólida

resultado de secar la biomasa a 105 °C hasta peso constante [66,67]. Por otro lado, los sólidos volátiles se definen como la parte orgánica de una muestra seca que se volatiliza al calentar la misma a una temperatura de 550°C [84]. Aunque sería recomendable que la humedad disminuyera para cumplir con el rango de 10 a 15% de humedad sugerido por Césare et al. [75].

4.2 Caracterización de biomasa residual de *Guadua angustifolia*

La caracterización de la biomasa residual de *G. angustifolia* se realizó mediante un análisis proximal. El análisis proximal permite dar información primaria sobre la composición física y química de la biomasa, y así determinar los posibles usos que se puede dar a la misma [72]. Por medio de este análisis se obtiene el porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo de la biomasa [68]. Es así que, el análisis proximal de residuos de *G. angustifolia* arrojó que estos contienen un 13,03% de humedad, 77,76% de materia volátil, 3,63% de cenizas y 16,38% de carbono fijo. En la Tabla 7 se presenta una comparación de estos resultados con valores reportados por otros estudios para *G. angustifolia*.

A partir de la Tabla 7, se observa que la humedad de residuos de *G. angustifolia* es ligeramente elevada respecto a lo que se reporta en Folgueras et al. [55], González y Pliego [88], Fryda et al. [89] y Césare et al. [75]. Un alto valor de humedad consume mayor energía de la que se produce para vaporizar el agua, causando una combustión incompleta de la biomasa y bajos rendimientos [75]. Sin embargo, el valor obtenido (13,03%) entra en el rango de 10 a 15% de humedad sugerido por Césare et al. [75], para el uso de *G. angustifolia* en procesos energéticos. Adicionalmente, el porcentaje de materia volátil (77,76%) es ligeramente mayor a lo que se presenta en Folgueras et al. [55], González y Pliego [88], y Fryda et al. [89]. El valor de materia volátil se encuentra asociado a un mayor índice de reactividad de la biomasa [90], y a la presencia de celulosa y hemicelulosa [91]. Por otro lado, el porcentaje de cenizas (3,63%) se asemeja a lo detallado en Folgueras et al. [55], pero es menor a lo que menciona Fryda et al. [89]. Las cenizas son el resultado de la combustión completa de la biomasa a altas temperaturas [92], y su exceso provoca problemas como la formación de escorias, la corrosión de los equipos y la formación de sedimentos en el reactor [90]. En este caso, los residuos de *G. angustifolia* presentaron un contenido bajo de cenizas y alto para materia volátil, lo que significa se puede ocupar para producir biochar [88]. Por último,

el porcentaje de carbono fijo (16,38%) es mayor al detallado en Césare et al. [75] y casi similar al reportado por Romero et al. [93]. El carbono fijo es la fracción de la biomasa formado por estructuras de carbono aromático que no se volatiliza, es decir lo que resulta después de la liberación de la materia volátil y humedad [72,92]. Un alto porcentaje de carbono fijo indica un mayor poder calorífico de la biomasa, y por ende un mayor potencial energético [90].

Ahora, las diferencias entre los valores de cada parámetro reportado en este trabajo en comparación con otros estudios se pueden explicar debido a que las condiciones (luz solar, lluvias, nutrientes del suelo, etc.) en las que se desarrolla *G. angustifolia* varían de lugar en lugar, y esto influye en su composición [63]. No obstante, hay que aclarar que el análisis proximal no constituye el único método de caracterización para dar información sobre la composición de la biomasa. El análisis elemental (análisis de C, H, O, N, S), estructural (celulosa, hemicelulosa, lignina), y termal (poder calorífico, análisis termogravimétrico, etc.) complementan al análisis proximal para tener una idea más clara sobre el uso idóneo de cierto tipo de biomasa [72,94].

Tabla 7. Comparación del análisis proximal de *Guadua angustifolia* del presente trabajo con otros estudios.

Muestra	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Referencia
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	13,03	77,76	3,63	16,38	Presente estudio
	7,8	75,8	3,8	20,4	[55]
	11,15	76,36	3,19	9,31	[75]
	9,1	74,1	2,9	23,1	[88]
	9	75	5,7	-	[89]
	9	68,3	4,6	18,1	[93]

Realizado por: Puma, Luis, 2023

4.3 Rendimiento y pérdida de biomasa de biochar de residuos de *Guadua angustifolia*

Zhao et al. [60] en su estudio encontró una correlación negativa entre el rendimiento del biochar y la temperatura a la que este se produce. Esa tendencia se reportó en este

estudio en el biochar de *Guadua angustifolia* que se produjo a distintas temperaturas de pirólisis. Por su parte, Zhang et al. [54] en su estudio reportó una disminución en el rendimiento del biochar de bambú moso producido por pirólisis en el lapso de una hora y a diferentes temperaturas (de 200 a 800 °C). Los rendimientos fueron desde 95,89 % hasta 26,3%. Para las temperaturas de 600, 700 y 800 °C, los rendimientos fueron ligeramente mayores a los reportados en este estudio. Sin embargo, los rendimientos de biochar obtenidos a una temperatura de 450 y 600 °C fueron mayores a los reportados por Sun et al. [61]. Así mismo, Zhang et al. [54] menciona que la pérdida de biomasa es ligeramente mayor a temperaturas debajo de 400 °C por la descomposición termal de la celulosa, hemicelulosa y lignina.

Con respecto a la influencia del tiempo de residencia en el rendimiento y pérdida de biomasa del biochar de *G. angustifolia*, se observa en la Figura 6 que existe un ligero aumento en la pérdida de biomasa en aquellos biochar producidos a una hora versus los de 30 minutos. Teóricamente un mayor tiempo de pirólisis implicaría una mayor volatilización de la biomasa [60], y un menor rendimiento de biochar; pero en este caso, la diferencia entre someter *G. angustifolia* a distintos tiempos de pirólisis es casi mínima hablando en términos de rendimiento y pérdida de biomasa, a excepción del biochar producido a 700 °C. Este comportamiento del tiempo de residencia en el rendimiento del biochar se ajusta igual al estudio de Zhao et al. [60].

Entonces se puede acotar que, de las dos variables empleadas en este estudio para la producción de biochar de *G. angustifolia*, la temperatura es la más determinante en los valores de rendimiento de biochar y pérdida de biomasa. Al respecto, estudios termogravimétricos en *G. angustifolia* han encontrado 4 etapas diferenciadas durante el proceso de pirólisis [93,94] en las que la temperatura juega un rol fundamental. La primera etapa se registra antes de los 200 °C, y es donde se evapora agua y componentes volátiles ligeros. La segunda se establece de 200 a 330 °C y la tercera, de 300 a 380 °C, dando como resultado la descomposición de la hemicelulosa y celulosa. En la última etapa tiene lugar la descomposición de la lignina a partir de 380 °C [93]. La pérdida de biomasa es mayor durante la segunda y tercera etapa por liberación de componentes volátiles de la descomposición de la hemicelulosa, celulosa, y parte de la lignina [94,95].

Se entiende que bajas temperaturas (450 y 550 °C) y un tiempo de residencia menor (30 minutos) de pirólisis lenta de *G. angustifolia* llevan a un mayor rendimiento de biochar y evitan una mayor pérdida de biomasa. No obstante, hay que considerar las propiedades fisicoquímicas del biochar para así determinar las condiciones ideales en las que debe ser producido. Eso es algo que se discute a continuación.

4.4 Características fisicoquímicas de biochar de residuos de *Guadua angustifolia*

4.4.1 Morfología del biochar de *G. angustifolia*

La presencia de estructuras porosas en el biochar de *G. angustifolia* a temperaturas mayores de 450 °C se debe a que la celulosa y la hemicelulosa, compuestos de la pared celular se descomponen térmicamente a los 500 °C, según lo reportado por Hernandez et al. [96]. Esto explicaría porque a una temperatura de 450 °C no se visualiza poros en la superficie del biochar. Además, Zhao et al. [60] menciona que someter la biomasa de partida a un tiempo alto de pirólisis y a temperaturas elevadas causa mayor destrucción celular y una mayor área superficial específica. Es decir, mientras mayor sea la temperatura de pirólisis, mayor será el grado de destrucción de la biomasa. Así, se esperaría que se visualicen mayor cantidad de poros en el biochar de *G. angustifolia* conforme aumenta la temperatura según Sahoo et al. [95]. Y en efecto, se visualizó presencia de macroporos en el biochar producido a: 550 °C a una hora y 30 minutos, 600 °C a una hora, 800 °C a 30 minutos, y posiblemente a 600 °C a 30 minutos y 800 °C a una hora. Es probable que hacer un tratamiento (molido y tamizado) en las muestras de biochar previo al análisis por SEM, permita visualizar poros mejor definidos.

La presencia de poros es algo característico del biochar, que puede ser usado con fines agronómicos debido a que constituyen espacios en donde se pueden almacenar carga microbiana, retener agua y nutrientes del suelo [97]. En este caso, existen 3 tipos de poros según su diámetro interno: macroporos (diámetro mayor a 50 nm), mesoporos (diámetro entre 2 y 50 nm) y microporos (diámetro menor a 2 nm) [97]. En este estudio, por medio de las micrografías SEM, se observó macroporos que van desde 1944 a 3400 nm en el biochar producido a 800 °C y 30 minutos, y desde 988.5 hasta 6324 nm en el que se produjo a 600 °C y una hora. También se encontró dos macroporos que medían 54 400 y 77 790 nm. Por lo tanto, estas tres muestras de biochar pueden ser candidatos ideales para su uso en el campo agronómico [61,98].

4.4.2. Análisis químico elemental de biochar de *G. angustifolia*

El análisis por EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy o Espectroscopía de Dispersión de Energía) determinó la presencia de varios elementos en la superficie de cada biochar producido a diferentes condiciones de pirólisis. A un tiempo de residencia de 30 minutos, se observa que el carbono aumenta conforme se incrementa la temperatura de pirólisis, independiente de los valores bajos reportados a la temperatura de 550 °C y 700 °C, mientras que el oxígeno disminuye. Esa tendencia se ha reportado en el estudio realizado por Shaaban et al. [97]. Sin embargo, para un tiempo de residencia de una hora, dicha tendencia se cumple, pero a la inversa. Una disminución en el porcentaje del carbono probablemente se deba a una mayor liberación de componentes volátiles, es decir un mayor destrucción de la lignocelulosa de *G. angustifolia*. El alto contenido de oxígeno explicaría la presencia de grupos funcionales oxigenados (grupos hidroxilo y carbonilo) en el biochar que se produjo a 600 °C y una hora, que se relacionan con la naturaleza hidrofílica de un biochar [99].

Por otro lado, los minerales presentes en la superficie del biochar producido resultan de un aumento en el contenido de cenizas conforme aumenta la temperatura de carbonización de la biomasa[100–102]. Es así, que se explicaría el aumento en minerales como el potasio, calcio, sodio, azufre, magnesio, etc., en el biochar de *G. angustifolia* mientras se incrementa la temperatura de pirólisis[100]. De los minerales encontrados, se observa que el silicio es el más representativo en el biochar producido, independiente del tiempo de residencia y temperatura de pirólisis. Es probable que este mineral se encuentre en forma de sílice (SiO_2) debido a su baja volatilidad y a su alto contenido en este tipo de bambúes leñosos, pues ayuda mantener la estructura de los culmos [9,76]. Además, el potasio es el segundo elemento más disponible en el biochar producido. Este elemento puede estar presente en sales solubles en agua, las cuales tienen bajas temperaturas de descomposición y fusión durante los procesos térmicos [94]. Entonces, por su baja volatilidad también permanece en la superficie del biochar [9].

Finalmente, de cada biochar analizado se acota que aquel producido a 550 °C y 30 minutos posee mayor variedad de minerales (calcio, sodio, potasio, azufre, magnesio, níquel, zinc, hierro) en su superficie (Figura 11). Siendo un candidato idóneo para aplicaciones agronómicas y enmienda del suelo [61,64,98].

4.4.3 Análisis BET del biochar de *G. angustifolia*

El área superficial específica del biochar de *G. angustifolia* aumentó desde $309 \frac{m^2}{g}$ hasta casi el doble ($597 \frac{m^2}{g}$) conforme se aumentó la temperatura en el proceso de pirólisis desde 600 a 800 °C. Incluso a un mismo tiempo de residencia (30 minutos), el área superficial subió desde $309 \frac{m^2}{g}$ hasta casi el doble ($501 \frac{m^2}{g}$). Es así que, la temperatura es una variable que se correlaciona de manera positiva con el área superficial del biochar, es decir mientras mayor sea la temperatura se obtendrá una mayor área superficial específica [50,54,60,62]. Esto sucede por el aumento de la volatilización del material orgánico, lo que produce una estructura carbonosa-aromática y porosa consistente de tejido vascular a base de minerales y carbono [60,103]. El área superficial reportada para el biochar producido a 600 °C y 30 minutos es similar al que produjo Sahoo et al. [95] mientras que el producido a condiciones de 800 °C y una hora es mayor al que se reporta en Zhang et al. [54].

El área superficial del biochar es una propiedad importante, pues determina su capacidad de adsorción de metales pesados, agua y nutrientes [81]. Una área superficial mayor indica que el material es poroso, y puede tener aplicaciones para remediación ambiental, el tratamiento del agua y enmienda y mejora del suelo [50,91,98]. Bajo esas circunstancias, los 3 materiales que se analizaron son potenciales para ese tipo de aplicaciones. En especial, el biochar producido a 800 °C y una hora.

4.4.4 Química de grupos funcionales del biochar de *G. angustifolia*

La temperatura de pirólisis es un variable determinante en la presencia de grupos funcionales en la superficie del biochar [60,95]. Como se observa en la Figura 13, la intensidad de los picos de los grupos funcionales en cada uno de los biochar aumenta conforme aumenta la temperatura desde 600 a 800 °C. Únicamente en el caso de los grupos funcionales OH (hidroxilo), C=O (carbonilo) y C=C se pierden los picos, lo cual se debe a reacciones de deshidratación de la biomasa, que sugiere una disminución de los grupos funcionales polares con el aumento de la temperatura de pirólisis (desde 600 hasta 800 °C) [95]. Esta misma tendencia se ha reportado en Tu et al. [50] y Zhang et al. [54]. Keiluweit et al. [104] en su investigación detalla que esta disminución de grupos funcionales en el biochar se atribuye a que: 1) a temperaturas bajas de pirólisis hay una

pérdida de agua en componentes de la celulosa y lignina, 2) a temperaturas medias aflora una mayor cantidad de C aromático y derivados de la celulosa y lignina, y 3) a temperaturas elevadas, aumenta el grado de condensación de compuestos orgánicos aromáticos. Con respecto al tiempo de residencia, los espectros de BG 800 °C-30m y BG 800 °C-1h se mantuvieron constantes, únicamente existen ligeros desplazamientos en la vibración de los grupos funcionales de O-C-O (éter) y CH aromáticos. Lo que permite decir, que el tiempo de residencia a esta temperatura no influyó en la presencia de grupos funcionales.

Ahora, es importante mencionar que la presencia de grupos funcionales que tienen oxígeno en el biochar puede ser de utilidad en la remoción de metales en aguas contaminadas [50,60,91]. Por lo que, el biochar producido a 600 °C en un lapso de 30 minutos podría ser un candidato para este tipo de aplicaciones, por tener picos más definidos de estos grupos funcionales.

4.4.5 pH y conductividad eléctrica de *G. angustifolia*

Como se mencionó antes, el biochar de *G. angustifolia* tiene un pH básico, que aumenta conforme aumenta la temperatura sin importar el tiempo de pirólisis. Esta tendencia se reporta en los estudios de Zhang et al. [54], Sun et al. [61] y Sahoo et al. [95]. Al respecto, Tu et al. [50] menciona que el pH aumenta por un bajo contenido de materia volátil en el biochar, por grupos funcionales orgánicos como -OH y -COOH o porque a altas temperaturas se generan y acumulan sales inorgánicas (sodio, potasio, magnesio y calcio (Ca), algunos carbonatos (CaCO_3 y MgCO_3) y álcalis inorgánicos. Esta característica de alcalinidad del biochar puede permitir su aplicación en suelos ácidos para su neutralización y mejoramiento de nutrientes [50,54].

Al mismo tiempo, la conductividad eléctrica del biochar de *G. angustifolia* tiende a aumentar conforme aumenta la temperatura de pirólisis. Esta tendencia se reporta en los estudios de Tu et al. [50] y Li et al. [105]. Un valor alto de conductividad eléctrica está relacionado con el aumento de la temperatura del proceso de pirólisis. Esta condición permite la acumulación de sustancias alcalinas inorgánicas y la liberación de componentes volátiles de la biomasa [50]. Así mismo, un aumento de la conductividad eléctrica en el biochar con presencia de menos grupos funcionales ácidos ratifica que puede ser usado como enmienda del suelo [50,98].

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis del secado natural de cañas maduras de *G. angustifolia* durante 3 meses, se determinó que a partir del día 28 (primer mes) *G. angustifolia* requiere dos meses para alcanzar características idóneas (bajo porcentaje de humedad y alto porcentaje de sólidos totales y volátiles) para su aprovechamiento, sin exceso de energía y sólo por secado natural al sol.

Además, el bajo contenido de humedad y de cenizas, y un valor alto de materia volátil en los residuos sólidos (cañas secas) de *G. angustifolia* aseguró que dicha biomasa se pueda usar para producir biochar.

Por otro lado, se encontró que la temperatura es la variable que más influyo en la producción de biochar de *G. angustifolia*. A bajas temperaturas (450 y 550 °C) y un tiempo de residencia de 30 minutos se obtuvo rendimientos mayores y menor pérdida de biomasa.

Finalmente, de las dos variables empleadas en la pirólisis de *G. angustifolia* se comprobó que la temperatura es la que más influye en las propiedades fisicoquímicas del biochar producido. A mayor temperatura se visualizó mayor formación de estructuras porosas con presencia de minerales y grupos funcionales básicos en la superficie del biochar. De igual forma, al aumentar la temperatura de pirólisis desde 450 hasta 800 °C se obtuvo biochar con pH alcalinos y alta conductividad. De las propiedades analizadas, se destacó al biochar BG 800 °C-1h con una mayor área superficial específica ($597 \frac{m^2}{g}$), BG 600 °C-30m por presentar más grupos funcionales que contienen oxígeno e hidrógeno, BG 800 °C-30m, BG 600 °C-1h y BG 550 °C-1h por presentar macroporos bien definidos, y a BG 550 °C-30m por las trazas de minerales encontradas en su superficie.

Con la información detallada de las propiedades del biochar de *G. angustifolia*, el próximo paso a seguir constituye en estudiar e investigar la aplicación directa de biochar con miras a la enmienda y mejoramiento del suelo, remoción de metales pesados, o con fines energéticos para producción de biochar a escala de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tursi A. A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*. Green Wave Publishing of Canada; 2019. pp. 962–979. doi:10.18331/BRJ2019.6.2.3
2. Bonechi C, Consumi M, Donati A, Leone G, Magnani A, Tamasi G, et al. Biomass: An overview. *Bioenergy Systems for the Future: Prospects for Biofuels and Biohydrogen*. Elsevier Inc.; 2017. pp. 3–42. doi:10.1016/B978-0-08-101031-0.00001-6
3. Mamvura TA, Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*. Elsevier Ltd; 2020. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03531
4. Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press; 2018.
5. Sikarwar VS, Zhao M, Clough P, Yao J, Zhong X, Memon MZ, et al. An overview of advances in biomass gasification. *Energy Environ Sci*. 2016;9: 2939–2977. doi:10.1039/C6EE00935B
6. Ľudmila H, Michal J, Andrea Š, Aleš H. Lignin, potential products and their market value. *Wood Res*. 2015;60: 973–986.
7. Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Convers Manag*. 2004;45: 651–671. doi:10.1016/S0196-8904(03)00177-8
8. Siddiqui MTH, Nizamuddin S, Mubarak NM, Shirin K, Aijaz M, Hussain M, et al. Characterization and Process Optimization of Biochar Produced Using Novel Biomass, Waste Pomegranate Peel: A Response Surface Methodology Approach. *Waste Biomass Valorization*. 2019;10: 521–532. doi:10.1007/s12649-017-0091-y
9. Romero Millán LM, Sierra Vargas FE, Nzihou A. Characterization of Steam Gasification Biochars from Lignocellulosic Agrowaste Towards Soil Applications. *Waste Biomass Valorization*. 2021;12: 4141–4155. doi:10.1007/s12649-020-01241-9
10. Nzihou A. Handbook on characterization of biomass, biowaste and related by-products. *Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products*. Springer International Publishing; 2020. doi:10.1007/978-3-030-35020-8
11. Clark LG, Londoño X, Ruiz-Sanchez E. Bamboo Taxonomy and Habitat. 1st ed. In: Liese W, Köhl M, editors. *Bamboo*. 1st ed. Switzerland: Springer Cham; 2015. pp. 1–30. doi:10.1007/978-3-319-14133-6_1
12. Trujillo DJ, López LF. Bamboo material characterisation. 2nd ed. In: Harries KA, Sharma B, editors. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. 2nd ed. United States: Elsevier; 2020. pp. 491–520. doi:10.1016/B978-0-08-102704-2.00018-4
13. Divya D, Indran S, Bharath KN. Bamboo: A Potential Natural Material for Bio-composites. 1st ed. In: Jawaid M, Rangappa SM, Siengchin S, editors. *Bamboo Fiber Composites*. 1st ed. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 15–37. doi:10.1007/978-981-15-8489-3_2
14. Sawarkar AD, Shrimankar DD, Kumar M, Kumar P, Kumar S, Singh L. Traditional System Versus DNA Barcoding in Identification of Bamboo Species: A Systematic Review. *Mol Biotechnol*. 2021;63: 651–675. doi:10.1007/s12033-021-00337-4

15. Akinlabi ET, Anane-Fenin K, Akwada DR. Bamboo Taxonomy and Distribution Across the Globe. 1st ed. Bamboo. 1st ed. Cham: Springer International Publishing; 2017. pp. 1–37. doi:10.1007/978-3-319-56808-9_1
16. Ahmad Z, Upadhyay A, Ding Y, Emamverdian A, Shahzad A. Bamboo: Origin, Habitat, Distributions and Global Prospective. 1st ed. In: Ahmad Z, Ding Y, Shahzad A, editors. Biotechnological Advances in Bamboo. 1st ed. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 1–31. doi:10.1007/978-981-16-1310-4_1
17. Emamverdian A, Ding Y, Ranaei F, Ahmad Z. Application of bamboo plants in nine aspects. The Scientific World Journal. 2020;2020.
18. Manandhar R, Kim J-H, Kim J-T. Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2019;18: 49–59. doi:10.1080/13467581.2019.1595629
19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Forest Resources Assessment 2020. Rome; 2020. doi:10.4060/ca9825en
20. Correal JF, Echeverry JS, Ramírez F, Yamín LE. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated *Guadua angustifolia* Kunth. Constr Build Mater. 2014;73: 105–112. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.056
21. Yeasmin L, Ali MdN, Gantait S, Chakraborty S. Bamboo: an overview on its genetic diversity and characterization. 3 Biotech. 2015;5: 1–11. doi:10.1007/s13205-014-0201-5
22. Añazco M. Estudio de vulnerabilidad al cambio climático orientado a la caña guadua En la región costa del Ecuador y Perú. Quito, Ecuador; 2013. Available: https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/estudio-de-vulnerabilidad-al-cambio-climatico-la-cana-guadua-en-la-region-costa-del-ecuador-y-peru/
23. Añazco M, Rojas S. Estudio de la Cadena desde la Producción al Consumo del Bambú en Ecuador. Quito, Ecuador; 2015. Available: https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/estudio-de-la-cadena-desde-la-produccion-al-consumo-del-bambu-en-ecuador-con-enfasis-en-la-especie-guadua-angustifolia/
24. Bamboo Sectoral Table, Ministry of Agriculture and Livestock, International Bamboo and Rattan Organisation. 2018_ Ecuador- National Bamboo Strategy_Guidelines for a Green and Inclusive Development. INBAR. Quito, Ecuador: INBAR; 2018. pp. 1–113. Available: <https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2020/05/1559207090.pdf>
25. Añazco Romero MJ. Vulnerability of ecosystems with *Guadua angustifolia* in Ecuador in light of climate changes. Pesqui Agropecu Trop. 2019;49. doi:10.1590/1983-40632019v4955405
26. Giuseppina Vanga M, Briones O, Zevallos I, Delgado D. Bioconstrucción de vivienda unifamiliar de interés social con caña *Guadua angustifolia* Kunth. Novasinergia Revista digital de ciencia, ingeniería y tecnología. 2021;4: 53–73. doi:10.37135/ns.01.07.03
27. Castro Priego M, Barcia Moreira MA, Labrada Ochoa MO, Chasing Guagua EA. La guadúa que se corta: paisajes culturales y patrimonio construido en la costa ecuatoriana (Manabí, Ecuador). Rev Esp Antropol Am. 2019;48: 79–103. doi:10.5209/REAA.63691
28. INBAR. El manejo de guaduales naturales, La experiencia del Proyecto Maneja Integral de Guadua en el Norte de Manglaralto. Quito, Ecuador; 2010 Dec.

29. Londoño X. Distribución, Morfología, Taxonomía, Anatomía, Silvicultura Y Usos de los bambúes del Nuevo Mundo. In: Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Construcción - Módulo Guadua. Aug 2002.
30. Narváez Chamorro SL. Desarrollo de losas con caña de *Guadua angustifolia* y análisis comparativo estructural y económico con los sistemas de losas tradicionales utilizados en nuestro medio. Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica del Ejército. 2013.
31. Zamora Bringas GP. El biochar de *Guadua angustifolia* Kunth procedente de los residuos del aprovechamiento de plantaciones forestales como enmienda orgánica para el suelo. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina. 2020.
32. Banik RL. Morphology and Growth. 1st ed. In: Liese W, Köhl M, editors. Bamboo. 1st ed. Switzerland: Springer Cham; 2015. pp. 43–89. doi:10.1007/978-3-319-14133-6_3
33. Caro Mejía JA. Manejo específico por sitio en el aprovechamiento de *Guadua angustifolia*: Implementación de un SIG para la trazabilidad de los tallos de guadua en la hacienda Maravélez, municipio de La Tebaida, Quindío-Colombia. Tesis de Maestría, Universidad San Francisco de Quito. 2014.
34. Villamar Choez JB. Determinación del impacto ambiental, económico y social que genera la caña (*Guadua angustifolia* Kunth), Santa Lucía-Guayas, Ecuador. Tesis de Pregrado, Universidad Agraria del Ecuador. 2020.
35. Landeta L, Díaz J. Elaboración de escabeche utilizando rebrotes de caña guadua (*Guadua angustifolia* Kunth). Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte. 2011.
36. Gutiérrez GO, de Lira Fuentes RC. ELABORACIÓN DE BIOCARBÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PROVENIENTE DE LAS PODAS DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia*) [ELABORATION OF BIOCHAR FOR THE USE OF RESIDUES FROM BAMBOO (*Guadua angustifolia*) PRUNES WASTES]. Revista Mexicana de Agroecosistemas. 2020;7: 1.
37. International Biochar Initiative (IBI). List of frequently asked questions What is biochar? 17 Mar 2023 [cited 16 Mar 2023]. Available: <https://biochar-international.org/about-biochar/faqs/>
38. Munongo ME, Nkeng GE, Njukeng JN. Production and characterization of compost manure and biochar from cocoa pod husks. International Journal of Advanced Scientific Research and Management. 2017;2: 26–31.
39. Liu N, Charrua AB, Weng C-H, Yuan X, Ding F. Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study. Bioresour Technol. 2015;198: 55–62. doi:10.1016/j.biortech.2015.08.129
40. Liang C, Gascó G, Fu S, Méndez A, Paz-Ferreiro J. Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. Soil Tillage Res. 2016;164: 3–10. doi:10.1016/j.still.2015.10.002
41. Masís-Meléndez F, Segura-Chavarría D, García-González CA, Quesada-Kimsey J, Villagra-Mendoza K. Variability of Physical and Chemical Properties of TLUD Stove Derived Biochars. Applied Sciences. 2020;10: 507. doi:10.3390/app10020507
42. Otterpohl R, Glaser B, Klimek F, Bettendorf T. Terra Preta sanitation 1. Background, principles and innovations. 2015.
43. Xiang W, Zhang X, Chen J, Zou W, He F, Hu X, et al. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. Chemosphere. Elsevier Ltd; 2020. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126539

44. Xia S, Song Z, Jeyakumar P, Bolan N, Wang H. Characteristics and applications of biochar for remediating Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Environ Geochem Health*. 2020;42: 1543–1567.
45. Panwar NL, Pawar A, Salvi BL. Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Appl Sci*. 2019;1: 1–19.
46. Mohan D, Abhishek K, Sarswat A, Patel M, Singh P, Pittman CU. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration—a sustainable solution to crop-residue burning in India. *RSC Adv*. 2018;8: 508–520.
47. Man KY, Chow KL, Man YB, Mo WY, Wong MH. Use of biochar as feed supplements for animal farming. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2021;51: 187–217.
48. Bolan N, Hoang SA, Beiyuan J, Gupta S, Hou D, Karakoti A, et al. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*. 2022;67: 150–200.
49. Zinla D, Gbaha P, Koffi PME, Koua BK. Characterization of rice, coffee and cocoa crops residues as fuel of thermal power plant in Côte d'Ivoire. *Fuel*. 2021;283: 119250.
50. Tu P, Zhang G, Wei G, Li J, Li Y, Deng L, et al. Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresour Bioprocess*. 2022;9: 131. doi:10.1186/s40643-022-00618-z
51. Aysu T, Küçük MM. Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. *Energy*. 2014;64: 1002–1025. doi:10.1016/j.energy.2013.11.053
52. Setter C, Borges FA, Cardoso CR, Mendes RF, Oliveira TJP. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. *Ind Crops Prod*. 2020;154: 112731. doi:10.1016/j.indcrop.2020.112731
53. Angin D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresour Technol*. 2013;128: 593–597. doi:10.1016/j.biortech.2012.10.150
54. Zhang Y, Ma Z, Zhang Q, Wang J, Ma Q, Yang Y, et al. Comparison of the Physicochemical Characteristics of Biochar Pyrolyzed from Moso Bamboo and Rice Husk with Different Pyrolysis Temperatures. *Bioresources*. 2017;12: 4652–4669.
55. Folgueras MB, Fernández FJ, Ardila CR, Alonso M, Lage S. Fast pyrolysis of *Guadua angustifolia* Kunth. *Energy Procedia*. 2017;136: 60–65. doi:10.1016/j.egypro.2017.10.283
56. Chu GM, Jung CK, Kim HY, Ha JH, Kim JH, Jung MS, et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar as antibiotic alternatives on growth performance, immune responses and fecal microflora population in fattening pigs. *Animal Science Journal*. 2013;84: 113–120.
57. Wang R, Wei S, Jia P, Liu T, Hou D, Xie R, et al. Biochar significantly alters rhizobacterial communities and reduces Cd concentration in rice grains grown on Cd-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2019;676: 627–638.
58. Li X, Xiao J, Salam MMA, Ma C, Chen G. Impacts of bamboo biochar on the phytoremediation potential of *Salix psammophila* grown in multi-metals contaminated soil. *Int J Phytoremediation*. 2021;23: 387–399. doi:10.1080/15226514.2020.1816893
59. Villagra-Mendoza K, Masís-Meléndez F, Quesada-Kimsey J, García-González CA, Horn R. Physicochemical Changes in Loam Soils Amended with Bamboo Biochar and Their Influence in Tomato Production Yield. *Agronomy*. 2021;11: 2052. doi:10.3390/agronomy11102052

60. Zhao B, O'Connor D, Zhang J, Peng T, Shen Z, Tsang DCW, et al. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *J Clean Prod.* 2018;174: 977–987. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.013
61. Sun Y, Gao B, Yao Y, Fang J, Zhang M, Zhou Y, et al. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal.* 2014;240: 574–578. doi:10.1016/j.cej.2013.10.081
62. Tsai C-H, Tsai W-T, Liu S-C, Lin Y-Q. Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature. *Biomass Convers Biorefin.* 2018;8: 237–243.
63. Nimmanterdwong P, Chalermisinsuwan B, Piumsomboon P. Prediction of lignocellulosic biomass structural components from ultimate/proximate analysis. *Energy.* 2021;222: 119945. doi:10.1016/j.energy.2021.119945
64. Wijitkosum S. Repurposing Disposable Bamboo Chopsticks Waste as Biochar for Agronomical Application. *Energies (Basel).* 2023;16: 771. doi:10.3390/en16020771
65. Salgado MAH, Tarelho LAC. Biochar production as an alternative for energetic valorization or residual biomass generated in the Ecuadorian agroindustrial sector: a participative approach. *Boletín del Grupo Español del Carbón.* 2018; 6–11.
66. Calderón Loo M, Andrade F, Lizaraburu L, Masache M. Valoración económica de los cobeneficios del aprovechamiento energético de los residuos agrícolas en el Ecuador. 2017.
67. Adjin-Tetteh M, Asiedu N, Dodoo-Arhin D, Karam A, Amaniampong PN. Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Ind Crops Prod.* 2018;119: 304–312.
68. Manjunath H, Palled V, Veerangouda M, Maski D, Ramachandra CT. Physico-chemical and thermal properties of different biomass material selected for thermal gasification. *International Journal of Agricultural Engineering.* 2018;11: 276–281. doi:10.15740/HAS/IJAE/11.2/276-281
69. Sluiter A, Hames B, Hyman D, Payne C, Ruiz R, Scarlata C, et al. Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date: 3/31/2008. 2008. Available: www.nrel.gov
70. Nsamba HK, Hale SE, Cornelissen G, Bachmann RT. Improved Gasification of Rice Husks for Optimized Biochar Production in a Top Lit Updraft Gasifier. *J Sustain Bioenergy Syst.* 2014;04: 225–242. doi:10.4236/jsbs.2014.44021
71. Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D. Determination of Ash in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date: 7/17/2005. 2008. Available: www.nrel.gov
72. Pham Minh D, Accart P, Boachon C, Calvet R, Chesnaud A, Del Confetto S, et al. Generic and Advanced Characterization Techniques. In: Nzihou A, editor. *Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products.* Cham, Switzerland: Springer International Publishing; 2020. pp. 31–497. doi:10.1007/978-3-030-35020-8_2
73. Birwatkar VR, Khandetod YP, Mohod AG, Dhande KG, Source OE, Dapoli T, et al. Physical and thermal properties of biomass briquetted fuel. *Ind J Sci Res and Tech.* 2014;2: 55–62.
74. Martínez-Ángel JD, Villamizar-Gallardo RA, Ortiz-Rodríguez O. Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source. *Agrociencia.* 2015;49: 329–345.

75. Césare MF, Hilario F, Callupe N, Cruz L, Calle JL, Gonzales HE. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DEL BAMBÚ CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF BAMBOO. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 2019;10: 1–13. Available: <http://www.executivebs.org/publishing.cl/>
76. Alchouron J, Navarathna C, Chludil HD, Dewage NB, Perez F, Pittman Jr CU, et al. Assessing South American *Guadua chacoensis* bamboo biochar and Fe₃O₄ nanoparticle dispersed analogues for aqueous arsenic (V) remediation. *Science of The Total Environment*. 2020;706: 135943.
77. Apaydin-Varol E, Pütün AE. Preparation and characterization of pyrolytic chars from different biomass samples. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2012;98: 29–36. doi:10.1016/j.jaap.2012.07.001
78. Singh B, Dolk MM, Shen Q, Camps-Arbestain M. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. 1st ed. In: Singh B, Camps-Arbestain M, Lehmann J, editors. *Biochar: A guide to analytical methods*. 1st ed. Csiro Publishing, Clayton, Australia; 2017.
79. Zhang H, Hay AG. Magnetic biochar derived from biosolids via hydrothermal carbonization: Enzyme immobilization, immobilized-enzyme kinetics, environmental toxicity. *J Hazard Mater*. 2020;384: 121272. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.121272
80. Patiño AAB, Lassalle VL, Horst MF. Magnetic hydrochar nanocomposite obtained from sunflower husk: A potential material for environmental remediation. *J Mol Struct*. 2021;1239: 130509. doi:10.1016/j.molstruc.2021.130509
81. Chen D, Liu D, Zhang H, Chen Y, Li Q. Bamboo pyrolysis using TG–FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields. *Fuel*. 2015;148: 79–86. doi:10.1016/j.fuel.2015.01.092
82. Wu L, Zhao X, Bi E. Predicting the effect of dissolved humic acid on sorption of benzotriazole to biochar. *Biochar*. 2022;4: 15. doi:10.1007/s42773-022-00134-5
83. Wang H, Wang X, Cui Y, Xue Z, Ba Y. Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (*Phyllostachys pubescens*): Product yield prediction and biochar formation mechanism. *Bioresour Technol*. 2018;263: 444–449. doi:10.1016/j.biortech.2018.05.040
84. Pattnaik D, Kumar S, Bhuyan SK, Mishra SC. Effect of carbonization temperatures on biochar formation of bamboo leaves. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;338. doi:10.1088/1757-899X/338/1/012054
85. Zhou J, Chen H, Thring RW, Arocena JM. Chemical Pretreatment of Rice Straw Biochar: Effect on Biochar Properties and Hexavalent Chromium Adsorption. *Int J Environ Res*. 2019;13: 91–105. doi:10.1007/s41742-018-0156-1
86. Hernández López S, Ávalos Vargas A, Zamudio Sánchez FJ, Orozco Gutiérrez G, Borja de la Rosa AM. Colorimetría de los tallos del bambú (*Guadua angustifolia*) en tres estados de madurez. *Maderas Ciencia y tecnología*. 2020;23. doi:10.4067/S0718-221X2021000100408
87. Cárdenas JI, Vargas-Hernandez C. Vibrational and Compositional Analysis Associated with the Color of *Guadua angustifolia* Kunth Variety Bicolor (GAKVB). *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014: 1–8. doi:10.1155/2014/429314
88. González PG, Pliego-Cuervo YB. Physicochemical and microtextural characterization of activated carbons produced from water steam activation of three bamboo species. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2013;99: 32–39. doi:10.1016/j.jaap.2012.11.004
89. Fryda L, Daza C, Pels J, Janssen A, Zwart R. Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants. *Biomass Bioenergy*. 2014;65: 28–41. doi:10.1016/j.biombioe.2014.03.044

90. Rodríguez-Romero LA, Gutiérrez-Antonio C, García-Trejo JF, Feregrino-Pérez AA. Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *Tecnológicas*. 2022;25: e2142. doi:10.22430/22565337.2142
91. Navas-Cárdenas C, Caetano M, Endara D, Jiménez R, Lozada AB, Manangón LE, et al. The Role of Oxygenated Functional Groups on Cadmium Removal using Pyrochar and Hydrochar Derived from *Guadua angustifolia* Residues. *Water*. 2023;15. doi:10.3390/w15030525
92. Bustamante García V, Carrillo Parra A, Prieto Ruíz JÁ, Corral-Rivas JJ, Hernández Díaz JC. Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Rev Mex Cienc For*. 2016;7: 5–23.
93. Romero Millán LM, Sierra Vargas FE, Nzihou A. Kinetic Analysis of Tropical Lignocellulosic Agrowaste Pyrolysis. *Bioenergy Res*. 2017;10: 832–845. doi:10.1007/s12155-017-9844-5
94. Ardila CR, Folgueras MB, Fernández FJ. Oxidative pyrolysis of *Guadua angustifolia* Kunth. *Energy Reports*. 2020;6: 738–743. doi:10.1016/j.egy.2019.09.057
95. Sahoo SS, Vijay VK, Chandra R, Kumar H. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Clean Eng Technol*. 2021;3. doi:10.1016/j.clet.2021.100101
96. Hernandez-Mena LE, Pecora AAB, Beraldo AL. Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. *Chem Eng Trans*. 2014;37: 115–120. doi:10.3303/CET1437020
97. Shaaban A, Se SM, Dimin MF, Juoi JM, Mohd Husin MH, Mitan NMM. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2014;107: 31–39. doi:10.1016/j.jaap.2014.01.021
98. Yao Y, Gao B, Zhang M, Inyang M, Zimmerman AR. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*. 2012;89: 1467–1471. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.06.002
99. Tsai, Hsu, Lin, Tsai, Chen, Chang. Enhancing the Pore Properties and Adsorption Performance of Cocoa Pod Husk (CPH)-Derived Biochars via Post-Acid Treatment. *Processes*. 2020;8: 144. doi:10.3390/pr8020144
100. Zama EF, Zhu Y-G, Reid BJ, Sun G-X. The role of biochar properties in influencing the sorption and desorption of Pb (II), Cd (II) and As (III) in aqueous solution. *J Clean Prod*. 2017;148: 127–136.
101. Rafiq MK, Bachmann RT, Rafiq MT, Shang Z, Joseph S, Long R. Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (*Zea mays* L.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. *PLoS One*. 2016;11: e0156894.
102. Zhao S-X, Ta N, Wang X-D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies (Basel)*. 2017;10: 1293.
103. Peterson SC, Jackson MA. Simplifying pyrolysis: Using gasification to produce corn stover and wheat straw biochar for sorptive and horticultural media. *Ind Crops Prod*. 2014;53: 228–235. doi:10.1016/j.indcrop.2013.12.028
104. Keiluweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M. Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar). *Environ Sci Technol*. 2010;44: 1247–1253. doi:10.1021/es9031419
105. Li X, Shen Q, Zhang D, Mei X, Ran W, Xu Y, et al. Functional Groups Determine Biochar Properties (pH and EC) as Studied by Two-Dimensional ¹³C NMR Correlation Spectroscopy. *PLoS One*. 2013;8: e65949. doi:10.1371/journal.pone.0065949