DESARROLLO DE UN BIOCHAR A PARTIR DE BAGAZO DE FIQUE *Furcraea spp.* A TRAVÉS DE UN PROCESO DE TORREFACCIÓN

Juliana Cardona Ceballos

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Agropecuaria

Codirector
Victor Hugo Borda Yepes, Doctor (PhD) en Ingeniería en Sistemas Energéticos

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Agrarias
Ingeniería Agropecuaria
El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia
2023

Cita	Cardona Ceballos y Borda Yepes [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] J. Cardona Ceballos y V. H. Borda Yepes, “DESARROLLO DE UN BIOCHAR A PARTIR DE BAGAZO DE FIQUE *Furcraea spp*. A TRAVÉS DE UN PROCESO DE TORREFACCIÓN”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Agropecuaria, Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Antioquia, Colombia, 2023.

creative commons BY NC SA

Semillero de Investigación en Sistemas Agropecuarios Sostenibles (SISAS).

Centro de Investigación Agrarias (CIAG).

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia
Sistema de Bibliotecas

Biblioteca Seccional Oriente (El Carmen de Viboral)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios, Él, que nunca me abandona en los momentos en los que siento desfallecer y pienso en rendirme; a mis padres y hermano que han depositado confianza y esfuerzos en mí, para que pudiera culminar mi carrera profesional como Ingeniera Agropecuaria, su luchas constantes e inmedibles en la titánica labor de labrar y cultivar la tierra, proporcionándome así, todo lo necesario para que nunca me faltara nada y pudiera realizar mis estudios, teniendo como meta el título de Ingeniera Agropecuaria. Espero familia, algún día retribuirles todos los esfuerzos que hacen día a día por mí; y reflejar en los demás todo ese amor y bonita formación humana que me han inculcado desde pequeña.

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a mi asesor y codirector Victor Borda por enseñarme cada día herramientas y conocimientos que enriquecen mi formación profesional, apoyándome y guiándome constantemente en todos los procesos necesarios para llevar a cabo la torrefacción y análisis del bagazo de fique *Furcraea spp*, con el propósito de proponer una solución y uso al bagazo de fique para reducir el impacto negativo en el medio ambiente; al fiquero sanvicentino Javier Santa que proporcionó el bagazo necesario para este estudio; de nuevo a mis padres y hermano que gestionaron para que yo pudiera almacenar y conservar el material durante el tiempo de estudio; a los laboratorios de la Universidad de Antioquia, Seccional Oriente por el préstamo de equipos necesarios para este estudio, y a su personal de alta calidad profesional y humana que también apoyaron mi proceso experimental; y por supuesto a la asociación AFAS por brindarme información sobre el fique. Muchas bendiciones a todos ellos y a todos los que indirectamente, de alguna manera me han apoyado en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 7

ABSTRACT 8

I. INTRODUCCIÓN 9

II. OBJETIVOS 10

A. Objetivo general 10

B. Objetivos específicos 10

III. MARCO TEÓRICO 11

IV. METODOLOGÍA 13

A. Obtención del material 14

B. Proceso de secado 14

C. Proceso de torrefacción 15

V. RESULTADOS 17

A. Caracterización del secado del fique 17

B. Análisis global de la Torrefacción del fique húmedo (HM) y seco (SM) 18

C. Análisis local de la Torrefacción del fique húmedo (HM) y seco (SM) 21

1) Torrefacción fique húmedo (HM): 21

2) Torrefacción fique seco (SM): 24

VI. CONCLUSIONES 27

VII. TRABAJOS FUTUROS 29

VIII. REFERENCIAS 30

ANEXOS 31

LISTA DE TABLAS

TABLA I. Estadística descriptiva de la prueba de secado del bagazo de fique. 17
TABLA II. Análisis de la varianza del rendimiento de masa de las muestras húmedo y seco, con respecto a la temperatura. 20
TABLA III. Comparación Post-hoc de temperatura en materiales húmedo (HM) y seco (SM), torrefactados. 20
TABLA IV. Análisis de la varianza del rendimiento de masa de las muestras húmedo y seco, con respecto al tiempo.....21
TABLA V. Comparación Post-hoc de tiempo en materiales húmedo (HM) y seco (SM), torrefactados. 21
TABLA VI. Comparación Post-hoc de temperatura, en material húmedo torrefactado (HM).....22
TABLA VII. Comparación Post-hoc de tiempo, en material húmedo torrefactado (HM). 24
TABLA VIII. Comparación Post-hoc de temperatura, en material seco torrefactado (SM).....25
TABLA IX. Comparación Post-hoc de tiempo, en material seco torrefactado (SM). 25

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Ruta de procesos de torrefacción de bagazo de fique. 14
Fig. 2. Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco (a). Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco considerando la temperatura (b). Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco considerando el tiempo (c). 19
Fig. 3. Distribución de medias del rendimiento masa del material húmedo (HM), torrefactado a diferentes temperaturas (a). Distribución de medias del rendimiento masa del material seco (SM), torrefactado a diferentes temperaturas (b). 22
Fig. 4. Distribución de medias del rendimiento masa del material húmedo (HM), torrefactado a diferentes tiempos (a). Distribución de medias del rendimiento masa del material seco (SM), torrefactado a diferentes tiempos (b). 23
Fig. 5. Resultado de materiales, torrefactados húmedo (HM) y seco (SM). 26

RESUMEN

Se plantea desarrollar un biochar a partir de un residuo de bagazo de fique presente en el municipio de San Vicente Ferrer, Antioquia, el cual ha generado problemas ambientales en las fuentes hídricas y en los suelos. A través de un proceso termoquímico como la torrefacción, se plantea elaborar unas pruebas en temperaturas dentro de un rango de 200 °C a 300° C con dos estados del material de fique: húmedo (HM) y seco (SM), a los cuales se les evalúa el rendimiento másico en el proceso, por medio de un análisis descriptivo y ANOVA de un factor. Este estudio tiene como finalidad darle un aprovechamiento al bagazo, transformándolo en un material biosólido que podría tener muchas funcionalidades benéficas tanto para el área agrícola como para otras áreas industriales, esto, permitiría en un futuro, reducir el impacto ambiental que genera el depositar el residuo directamente en el medio ambiente. Los resultados evidencian que hay diferencia en la torrefacción del bagazo en sus dos estados físicos húmedo (HM) y seco (SM), el material seco (SM) tiene un mejor comportamiento en torno al rendimiento masa. Se concluye que el material seco (SM) tiene una media en rendimiento masa de 70.21 ± 6.83 %; con un mayor aprovechamiento de masa a 230°C con 80 minutos de exposición.

Palabras clave — **Fique, torrefacción, bagazo, humedad.**

ABSTRACT

It is proposed to develop a biochar from a fique bagasse residue present in the municipality of San Vicente Ferrer, Antioquia, which has generated environmental problems in water sources and soils. Through a thermochemical process such as torrefaction, it is proposed to elaborate some tests in temperatures within a range of 200 °C to 300° C with two states of the fique material: humid (HM) and dry (SM), to which the mass yield in the process is evaluated, by means of a descriptive analysis and ANOVA of one factor. The purpose of this study is to take advantage of bagasse, transforming it into a biosolid material that could have many beneficial functionalities for the agricultural area as well as for other industrial areas, this would allow, in the future, to reduce the environmental impact generated by depositing the residue directly in the environment. The results show that there is a difference in the bagasse torrefaction in its two physical states, wet (HM) and dry (SM), the dry material (SM) has a better performance in terms of mass yield. It is concluded that the dry material (SM) has a mean mass yield of 70.21 ± 6.83 %; with a higher mass utilization at 230°C with 80 minutes of exposure.

Keywords — **Fique, torrefaction, bagasse, humidity.**

I. INTRODUCCIÓN

La planta de fique, *Furcraea spp*. es una planta que posee características xerófilas, sus hojas lanceoladas y carnosas, de color verde y con capa cerosa en el envés, algunas especies pueden tener o no espinas en los bordes, se caracteriza por producir fibra; se cultiva entre los 1000-2000 msnm [1]. En el proceso de desfibrado de fique solo se utiliza el 4% de la composición de la hoja, siendo el 96% restante, líquido y bagazo desechado [2]. Estos residuos contaminan los afluentes de agua y las áreas de plantación de fique donde son depositados sin ningún manejo agrícola previo, conllevando esto a problemas de contaminación de los recursos ambientales y de fauna acuática [3].

La producción de fibra de fique en Colombia en el año 2018 fue de 18.982 Ton. Los mayores productores son Nariño, Cauca, Santander, Antioquia y Guajira con un 99% de la producción. Siendo Antioquia y Guajira los departamentos potenciales en la producción de fibra por su rendimiento en toneladas por hectárea [4]. Particularmente el municipio San Vicente Ferrer (Antioquia), culturalmente ha sido una de las zonas productoras de Antioquia, aunque ya no con la misma intensidad luego de la crisis de los años ochenta [5]. Actualmente, se conoció su producción en el 2022, esta equivale aproximadamente al 0,23% de fibra que se produce al nivel nacional [6]; vendida por medio de la Asociación de Fiqueros y Artesanos de la Cabuya del municipio de San Vicente Ferrer (AFAS), a la Compañía de Empaques S.A. de Medellín.

En la búsqueda de alternativas que permitan solucionar las problemáticas medioambientales actuales que rodean y de las cuales se es responsable directa e indirectamente el humano, se propone transformar en un sólido, uno de los subproductos del desfibrado de fique, el bagazo, el cual representa alrededor del 20% de la composición de la hoja [7], como posible solución a la contaminación de los suelos y fuentes hídricas [8].

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar un producto sólido a través de un proceso de torrefacción a partir del bagazo de fique *Furcraea spp.*

B. Objetivos específicos

Obtener un biochar a partir del bagazo de fique *Furcraea spp* en un proceso de torrefacción.

Analizar el producto sólido del bagazo de fique *Furcraea spp* en un proceso de torrefacción.

III. MARCO TEÓRICO

El bagazo de fique tiene una composición muy similar a la de la fibra larga, está conformado por estopa (fibra corta) y pulpa, estas están compuestas por celulosa en un 41% hemicelulosa en un 27%, y lignina en un 17%, aproximadamente [9]. Su composición da indicios de que se puede transformar en un sólido que no solo puede servir como forma de captación y tratamiento de bagazo, residuo contaminante, sino que también podría tener potencial de reutilización, que en un futuro se podrían estudiar. Pero se debe asumir como primer reto, que, para llegar a obtener sólidos, es determinante reducir su contenido de humedad, que es aproximadamente del 90% [7].

Se puede afirmar que en el municipio de San Vicente Ferrer (Antioquia), el 96% de líquidos que se genera en el desfibrado del fique, del cual la mayoría de los 120 fiqueros que conforman la Asociación de Fiqueros Artesanos de San Vicente Ferrer (AFAS), campesinos cultivadores de estas plantas, no le hacen un adecuado manejo final, no aplican buenas prácticas agrícolas; lo están dispersando en sus fincas haciendo que este manejo no sea sustentable.

A partir del conocimiento del proceso termoquímico se propone elaborar un producto sólido del bagazo de fique, biochar, por medio de procesos de temperatura, presión y medio inerte de reacción química (ausencia de oxígeno), que de acuerdo a la composición que posee, detendrá su descomposición fisicoquímica natural. Este proceso termoquímico es la torrefacción, que permite la mayor obtención posible de material sólido en comparación con otros tipos de tratamientos; a temperaturas que no sobrepasan los 300 °C, permitiendo una mayor conservación de las biomasas, en el tiempo, evaluando el material en dos estados húmedo y seco [10].

El biochar del bagazo de fique ha sido utilizado en algunos estudios previos, en donde se ha determinado que sus propiedades fisicoquímicas de valor agregado que permite controlar sustancias no biodegradables en el medio ambiente. El biochar tiene capacidad de adsorber compuestos hidrófobos e hidrófilos por su forma amorfa y heterogénea, determinado sus investigadores, que este fue eficiente en la eliminación de estos residuos médicos en el agua y confirman su potencial y confirman su potencial en la remedición ambiental [11]. Al igual que en otro estudio fue capaz de adsorber pesticidas policlorados, luego de ser activado térmicamente [12].

El biochar tiene un potencial para la biorremediación de suelos porque contribuye en la captura de carbono en el suelo, ayuda en la reducción de pérdida de nutrientes como el nitrógeno por lixiviación, aumenta la vida microbiológica en el suelo, además de regular la acidez presente, entre otros beneficios para suelos agotados [13]; sus características se deben en parte a que físicamente es amorfo y tiene alta porosidad importante para el transporte de moléculas en el suelo [14].

IV. METODOLOGÍA

El Bagazo de fique es un material que conforma entre un 20 a un 30% de los residuos del desfibrado del fique [7]. De él se estudia dos líneas como material objeto de estudio, el primero es el bagazo húmedo (HM) y el segundo el bagazo seco (SM), para este último se realiza un previo secado, pretratamiento con temperatura no superior a 120° C y así tener una materia con menor porcentaje de humedad.

Las variables de estudio son el peso (P) inicial y final del material antes y después del proceso termoquímico, la temperatura (T), el tiempo de torrefacción de las muestras a una temperatura constante. Mientras que la variable de chequeo es la pérdida de peso en los materiales húmedos y secos, antes y después de torrefactar a tres temperaturas diferentes: 230° C, 250° C y 280° C. Se utiliza el software JASP como herramienta de estudio estadístico de los datos recolectados, con los métodos de análisis descriptivo, ANOVA, Prueba de Levene y Comparación Post-Hoc.

En la **Fig. 1**, se ilustra a continuación en un diagrama, el proceso de las pruebas que se realizaron con las condiciones de temperatura (T), como parámetro de cambio en las muestras y el material con sus diferentes contenidos de humedad, debido a que las muestras de Material Húmedo (HM) sufrirán un proceso de torrefacción hidrotérmica y las muestras de Material Seco (SM) sufrirán un proceso de torrefacción térmica.

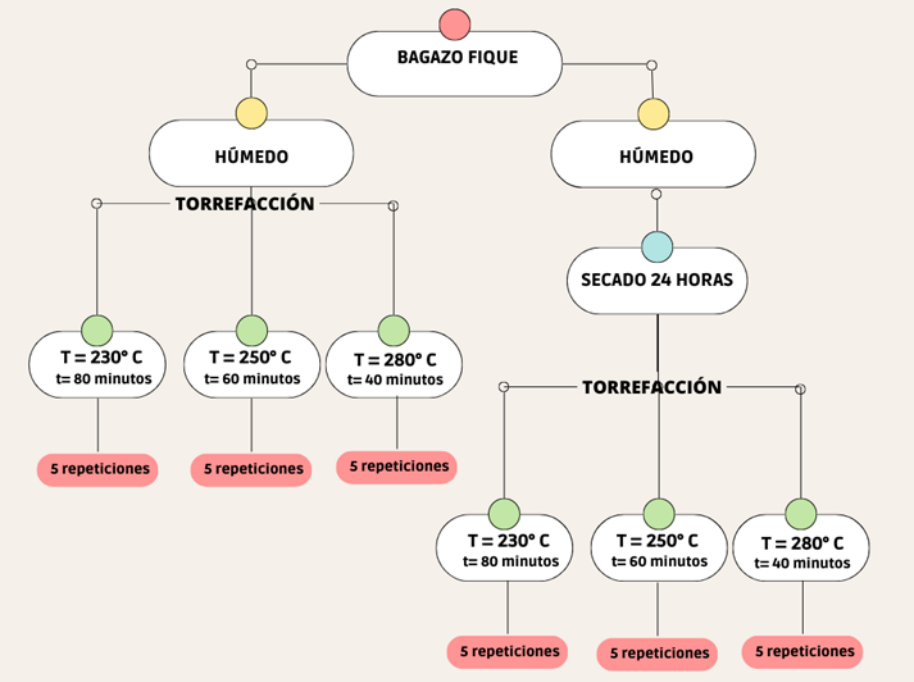


Fig. 1. Ruta de procesos de torrefacción de bagazo de fique.

A. Obtención del material

El bagazo se obtiene del desfibrado del fique de un cultivo tradicional, ubicado en el municipio de San Vicente Ferrer - Antioquia, vereda Chaparral, con coordenadas 6°16'21.8"N 75°22'47.4"W, perteneciente a un campesino fiquero, oriundo de la vereda. Posteriormente se empaca el bagazo en bolsas plásticas de doble sello hermético para ser almacenado en una nevera a un nivel 5 de enfriamiento, siendo el 7 el mayor rango de refrigeración, con el propósito de conservar el material durante el tiempo de realización de su estudio.

B. Proceso de secado

Se ingresan 5 repeticiones de bagazo con un peso promedio de 150 gramos cada recipiente cilíndrico aproximadamente, al horno con un secado por 24 horas, a 105 °C, para obtener un material seco tanto para analizar la humedad que tiene el bagazo antes de ser manipulado, como para obtener material necesario torrefactarlo, clasificado como (SM). La fórmula utilizada para la humedad es la ecuación (1):

$$H = \left(\frac{P_f - P_i}{P_i}\right) \qquad (1)$$

Donde P_i es el peso inicial, P_f es el peso final, y H es la fracción de humedad del material antes de ser manipulado.

C. Proceso de torrefacción

Se ingresan siempre 5 muestras como repeticiones para cada temperatura, para los dos tratamientos, hidrotérmico y térmico, las cuales son comprimidas manualmente en los recipientes metálicos para que tuvieran una superficie plana, así las radiaciones de calor dentro de la mufla afectasen las muestras de manera homogénea, evitando además espacios no ocupados por el material.

Cada muestra tiene un peso inicial de 50 gramos para el tratamiento hidrotérmico, HM; y un peso inicial de 20 gramos para cada muestra en el tratamiento térmico, SM; los pesos iniciales variaron porque en el momento de agregar también los 50 gramos del material SM no cabían, puesto que al ser éste un material menos denso o sin humedad, ocupará mayor espacio, pero no pesará igual que el mismo espacio que ha ocupado el material HM, lo anterior no causa problemas para el análisis de datos. Las muestras siempre se ingresan cuando la mufla ya ha alcanzado la temperatura a la que se ha propuesto exponerla (230° C, 250° C, o 280 °C).

En la torrefacción se degraden ciertas sustancias que puede contener el biosólido tales como la hemicelulosa casi en su totalidad, así como parte de su contenido en celulosa y un poco de lignina. Porque la torrefacción cambia la estructura química del material vegetal reduciendo su contenido de oxígeno y haciendo que el material tenga atributos de higroscopicidad [15]. Este estudio no tiene un alcance de medición de pérdidas de estos compuestos, pero se reconoce que en general algunos compuestos volátiles de baja densidad se escapan en el proceso de termoquímico, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido acético, metanol, ácido fórmico [15]. Para realizar comparaciones entre cada material, húmedo (HM) y seco (SM), expuesto a diferentes temperaturas lo que se realiza es un seguimiento de pérdida de peso, tomando como datos de estudio, el peso inicial y final, medidos en una balanza analítica.

La pérdida de peso se calcula mediante la ecuación (2):

$$\%P = \frac{W_f - W_i}{W_i} * 100\ \% \qquad (2)$$

Donde W_i es el peso inicial del material antes de torrefactarlo, W_f es el peso final del material después de torrefactarlo, y $\%P$ es el porcentaje de pérdida de peso del material torrefactado.

El rendimiento masa se determina mediante la ecuación (3):

$$\%MY = \frac{W_f}{W_i} * 100\ \% \qquad (3)$$

Donde W_i es el peso inicial del material antes de torrefactarlo, W_f es el peso final del material después de torrefactarlo, y $\%MY$ es el porcentaje del rendimiento del material torrefactado.

V. RESULTADOS

A. Caracterización del secado del fique

En la **TABLA I**, se denota los resultados obtenidos de la prueba de secado del bagazo de fique, la prueba arrojó que el contenido de humedad del bagazo es del 81 %, estos resultados son similares a los reportados en la literatura [7]. Esto nos indica que el material es rico en agua y su contenido es poco en sólidos, 19 %. El coeficiente de variación, 0.02 nos ilustra que la prueba tiene una baja variabilidad de resultados, lo que indica que es una prueba homogénea en la medición de los valores de la variable.

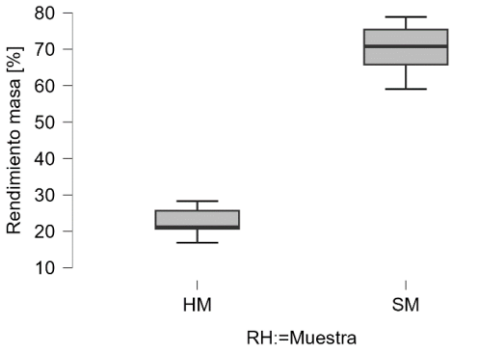
TABLA I. Estadística descriptiva de la prueba de secado del bagazo de fique.

Estadísticos Descriptivos	**Fracción de Agua**
Media	0.81
Desviación Típica	0.01
Coeficiente de variación	0.02
Varianza	1.67×10^{-4}

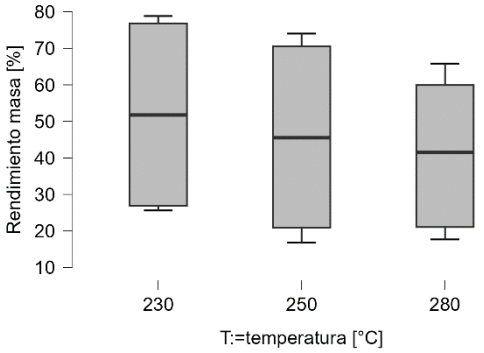
Los resultados anteriores se obtuvieron a través de la prueba de secado forzado en horno a una temperatura de 105° C por 24 horas, con base en esta información se procede a realizar la torrefacción en el material húmedo y seco en el bagazo de fique.

B. Análisis global de la Torrefacción del fique húmedo (HM) y seco (SM)

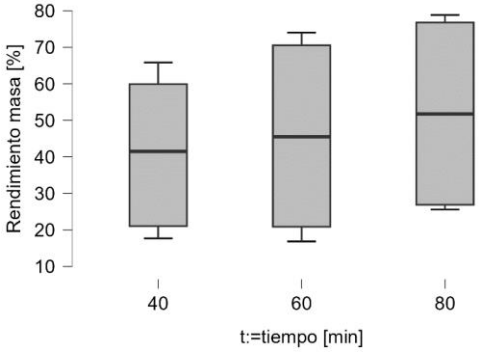
En la **Fig. 2**(a), se ilustra la distribución de masa de muestras húmedo y seco, donde se aprecia valores más altos de muestra para el material seco (SM), 70.21 ± 6.83 %, que para el material húmedo (HM), 22.47 ± 3.58 %. Esto indica que se obtiene una mejor torrefacción del material seco en cuanto al húmedo, en cuanto al rendimiento porcentual. En la **Fig. 2**(b), se ilustra que la distribución de masa de las muestras del material húmedo y seco presentan un rango de rendimiento masa muy similar, influenciado por la temperatura, donde las muestras no indican una diferencia marcada en distancia, con respecto a las tres temperaturas 280° C, 250° C, y 230° C, las tres cajas que se observan presentan una longitud o proporción similar que son 49.89, 49.66, 38.86 unidades porcentuales, respectivamente. Para la **Fig. 2**(c), se ilustra que el rendimiento masa del material húmedo y seco evaluado con respecto al tiempo, no muestra diferencias importantes, donde el tiempo de exposición a la torrefacción del material húmedo y seco no resalta un cambio evidente, además las tres cajas presentan longitudes o proporciones similares, 38.86, 49.66, 49.89 unidades porcentuales, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco (a). Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco considerando la temperatura (b). Distribución de medias para el rendimiento masa de muestras húmedo y seco considerando el tiempo (c).

En la **TABLA II,** se tienen los resultados de análisis de varianza, donde se acepta la hipótesis nula, porque está indicando que no hay diferencias significativas entre una muestra húmeda y seca, teniendo en cuenta como factor la temperatura. En el *Anexo A* se ilustra el análisis ANOVA, y Post-hoc.

TABLA II. Análisis de la varianza del rendimiento de masa de las muestras húmedo y seco, con respecto a la temperatura.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
T: =temperatura [°C]	549.03	2	274.52	0.43	0.66
Residuales	17374.30	27	643.49		

En la **TABLA III**, se observa los resultados del Post-hoc por medio de la prueba Tukey, el cual hace comparaciones entre cada grupo de temperatura a la que se sometió el material; donde se acepta la hipótesis nula; ningún grupo de temperatura resalta una media estadística significativa al compararse con los demás grupos, en cuanto al rendimiento masa en el material torrefactado, húmedo (HM) y seco (SM).

TABLA III. Comparación Post-hoc de temperatura en materiales húmedo (HM) y seco (SM), torrefactados.

Comparaciones Post-hoc - T: =temperatura [°C]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
230	250	6.19	-21.94	34.32	11.34	0.55	0.85
	280	10.42	-17.71	38.55	11.34	0.92	0.63
250	280	4.23	-23.90	32.36	11.34	0.37	0.93

En la **TABLA IV**, se ilustra como resultado en el análisis de varianza, ANOVA, que los rendimientos de masa del material húmedo y seco, no son significativamente diferentes, por lo cual se acepta la hipótesis nula. Esto es comprobado en la comparación de grupos de tiempo, Post-hoc

por medio de la prueba Tukey, en la **TABLA V** se observan los valores p resultantes. Se adjunta información adicional en el *Anexo B.*

TABLA IV. Análisis de la varianza del rendimiento de masa de las muestras húmedo y seco, con respecto al tiempo.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
t:=tiempo [min]	549.03	2	274.52	0.43	0.66
Residuales	17374.30	27	643.49		

TABLA V. Comparación Post-hoc de tiempo en materiales húmedo (HM) y seco (SM), torrefactados.

Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
40	60	-4.23	-32.36	23.90	11.34	-0.37	0.93
	80	-10.42	-38.55	17.71	11.34	-0.92	0.63
60	80	-6.19	-34.32	21.94	11.34	-0.55	0.85

C. Análisis local de la Torrefacción del fique húmedo (HM) y seco (SM)

1) Torrefacción fique húmedo (HM):

En la **Fig. 3**(a) se ilustra la distribución de medias del material húmedo torrefactado a diferentes temperaturas. En él se observa que las pruebas de 250° C y 280° C no tienen diferencias; sus barras de error al 95% de confianza no presentan cambios entre intervalos; mientras que para la temperatura de 230° C su barra de error al 95 % de confianza, sí presenta diferencias en contraste con las otras barras de error al 95% de confianza, 250° C y 280 °C.

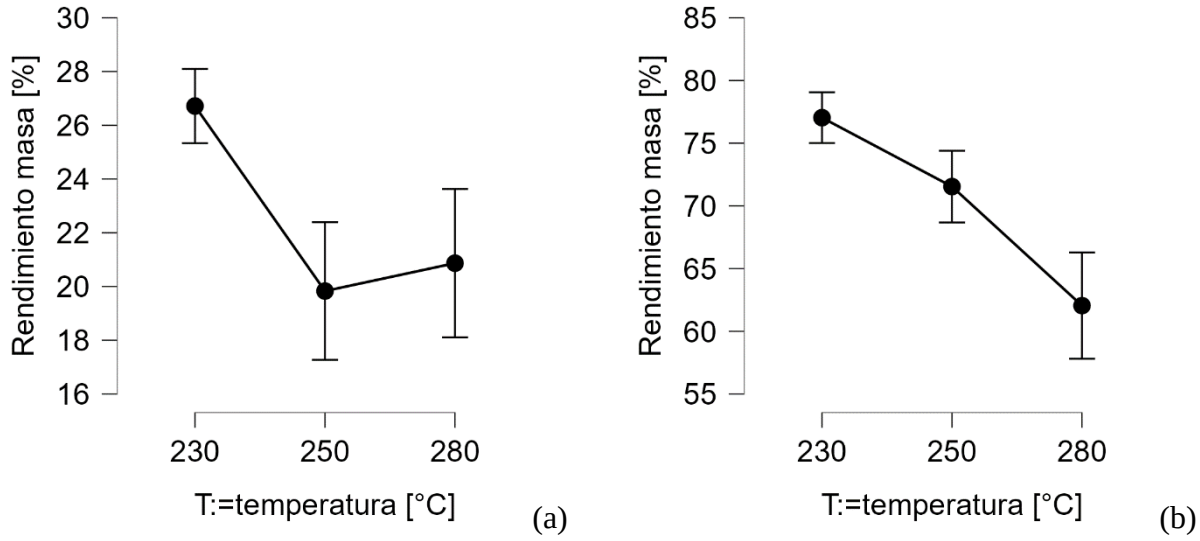


Fig. 3. Distribución de medias del rendimiento masa del material húmedo (HM), torrefactado a diferentes temperaturas (a). Distribución de medias del rendimiento masa del material seco (SM), torrefactado a diferentes temperaturas (b).

En la **TABLA VI**, se presenta la comparación Post-hoc de temperatura del rendimiento masa del material húmedo, en él se observa que hay diferencias significativas con la prueba Tukey, entre los grupos 230°C a los grupos 250-280°C. De acuerdo a esto se confirma la aceptación de la hipótesis alternativa, puesto que el Análisis de varianza ANOVA, que se encuentra en el *Anexo C*, arroja un valor menor a la significancia.

TABLA VI. Comparación Post-hoc de temperatura, en material húmedo torrefactado (HM).

Comparaciones Post-hoc - T: =temperatura [°C]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
230	250	6.88	3.74	10.03	1.18	5.83	< .001***
	280	5.85	2.70	9.00	1.18	4.95	< .001***
250	280	-1.04	-4.19	2.11	1.18	-0.88	0.66

** p < .01, *** p < .001

En la **Fig. 4**(a) se ilustra la distribución de medias del material húmedo torrefactado a diferentes tiempos. En él se observa que las pruebas de 40 min y 60 min no tienen diferencias; sus

barras de error al 95% de confianza no presentan cambios entre intervalos; mientras que para el tiempo de 80 min su barra de error al 95 % de confianza, sí presenta diferencias en contraste con las otras barras de error al 95% de confianza, 40 min y 60 min.

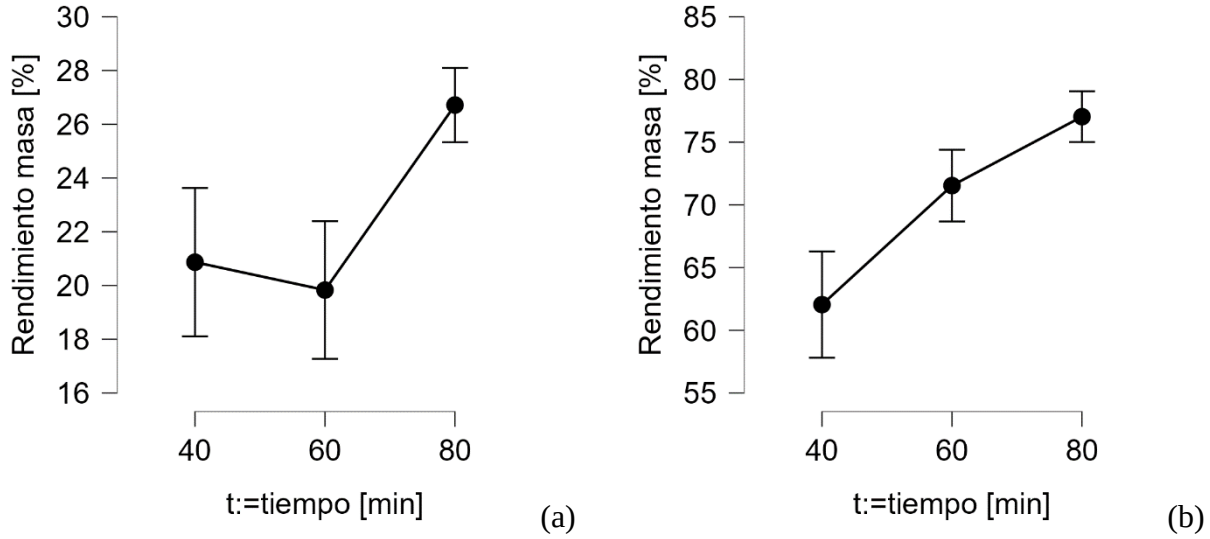


Fig. 4. Distribución de medias del rendimiento masa del material húmedo (HM), torrefactado a diferentes tiempos (a). Distribución de medias del rendimiento masa del material seco (SM), torrefactado a diferentes tiempos (b).

En la **TABLA VII**, se aprecia la comparación Post-hoc, que permite la comparación entre los grupos de tiempos a los que fue sometido el material húmedo (HM), se tiene como resultado la confirmación de la hipótesis alternativa, los diferentes tiempos aplicados tiene diferencia significativa, donde el tiempo de 80 minutos se diferencia de los 40 y 60 minutos, en términos de un mayor rendimiento masa. El análisis ANOVA se encuentre en *Anexo D*.

TABLA VII. Comparación Post-hoc de tiempo, en material húmedo torrefactado (HM).

Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias					
		Diferencia de Medias	**Inferior**	**Superior**	**ET**	**t**	**p_{Tukey}**	
40	60	1.04	-2.11	4.19	1.18	0.88	0.66	
	80	-5.85	-9.00	-2.70	1.18	-4.95	< .001	***
60	80	-6.88	-10.03	-3.74	1.18	-5.83	< .001	***

** p < .01, *** p < .001

2) Torrefacción fique seco (SM):

En la **Fig. 3**(b) se ilustra la distribución de medias del material seco torrefactado a diferentes temperaturas. En él se observa que la temperatura de 230° C y 250° C no presentan diferencias, las barras de error al 95% de confianza no presentan diferencias en sus intervalos; mientras que para la de 280° C la distribución de la media si presenta diferencias en su barra de error al 95% de confianza con respecto a las demás medias de 230° C y 250° C.

En la **TABLA VIII**, se percibe la comparación Post-hoc del rendimiento masa del material seco teniendo como factor la temperatura, en él se observa que hay diferencias significativas en la prueba Tukey entre los grupos 230°C a los grupos 250-280°C. Confirmando así que la hipótesis correcta es la alternativa, como lo indica la ANOVA con intervalo de confianza del 95 %, la cual se encuentra en el *Anexo E*.

TABLA VIII. Comparación Post-hoc de temperatura, en material seco torrefactado (SM).

Comparaciones Post-hoc - T:=temperatura [°C]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias					
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}	
230	250	5.50	1.18	9.81	1.62	3.40	0.01	*
	280	14.99	10.68	19.30	1.62	9.27	< .001	***
250	280	9.49	5.18	13.80	1.62	5.87	< .001	***

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

De acuerdo con la **Fig. 4**(b), se ilustra la distribución de medias del material seco (SM) torrefactado a diferentes tiempos. En él se observa que la prueba de 80 min se diferencia aparentemente con un mayor rendimiento masa de los otros tiempos; de acuerdo a su barra de error al 95% de confianza que presenta cambios entre intervalos; con las barras de error de los grupos de tiempos de 60 min y 40 min, ambas al 95 % de confianza.

En la **TABLA IX**, se aprecia la comparación Post-hoc, por medio de Tukey, allí se tiene que el menor rendimiento masa del material seco teniendo como factor el tiempo, es el grupo de 40 minutos puesto que su diferencia es significativa frente a los demás grupos de tiempo de 60 y 80 min, mientras que los grupos de tiempo que mayor rendimiento tuvieron sin diferenciarse entre ellos, es el de 60 min y 80 min. Entonces se confirma que la hipótesis correcta es la alternativa, como lo indica la ANOVA con intervalo de confianza del 95 %, la cual se encuentra en el *Anexo F*.

TABLA IX. Comparación Post-hoc de tiempo, en material seco torrefactado (SM).

Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias					
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}	
40	60	-9.49	-13.80	-5.18	1.62	-5.87	< .001	***
	80	-14.99	-19.30	-10.68	1.62	-9.27	< .001	***
60	80	-5.50	-9.81	-1.18	1.62	-3.40	0.01	*

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

En la **Fig. 5**, se ilustra los resultados de la torrefacción de los materiales HM y SM. Allí se puede comparar los cambios visuales que los materiales, húmedo (HM) y seco (SM) sufrieron a las mismas temperaturas y mismos tiempos.

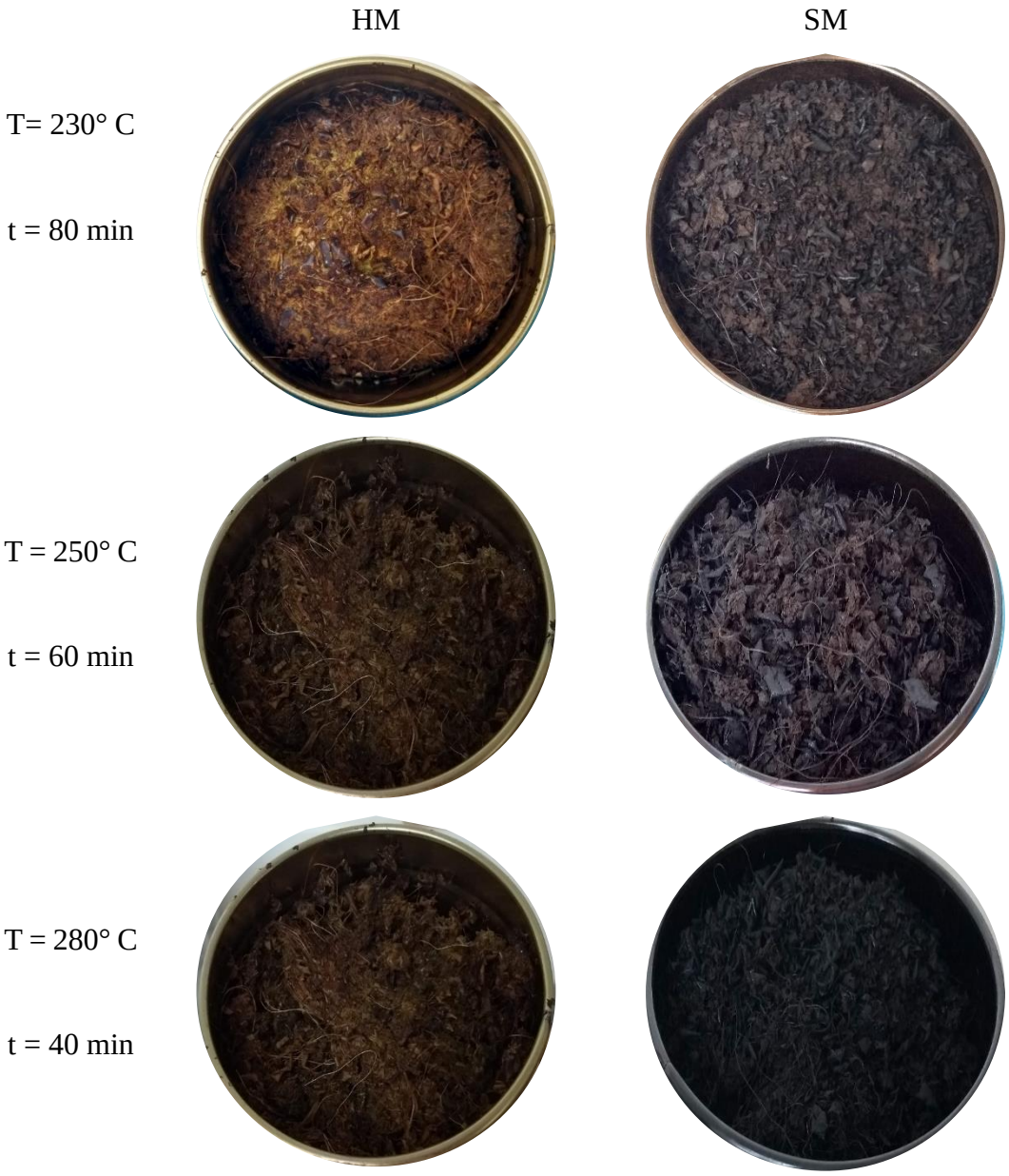


Fig. 5. Resultado de materiales, torrefactados húmedo (HM) y seco (SM).

VI. CONCLUSIONES

Los resultados del rendimiento masa informa que se obtiene mayor rendimiento en el material seco que en el material húmedo, debido al contenido de humedad del material húmedo (81 %), porque parte de la energía utilizada en la torrefacción se la consumió el agua en el proceso de evaporación.

Se indica que en el proceso experimental, el material húmedo (HM) no alcanzó ni siquiera su etapa de secado o pérdida de agua dentro de la mufla en ninguna de las temperaturas y tiempos aplicados; esto fue percibido en el momento de extraer el material, ya que presentaba adherencia en el fondo de los recipientes metálicos utilizados, luego de expuesto a la mufla en cada uno de las repeticiones; se infiere que como el proceso hidrotérmico no se dio por completo, los azucares posiblemente presentes en el material vegetal, no se pudieron volatilizar y como consecuencia quedaron adheridos dentro de los recipientes.

Al comparar los resultados del material torrefactado en húmedo (HM) y seco (SM) del bagazo de fique en la **Fig. 2**, se encuentra que hay una marcada diferencia de rendimiento masa entre ambos estados físicos del material, donde el seco (SM) presenta un mayor rendimiento, con una diferencia estadística entre ambas medias, de un 47.74 unidades porcentuales; lo anterior indica que el bagazo de fique debe ser sometido a un secado previo como lo indican en la literatura [7].

En el análisis global de los materiales del bagazo de fique, evaluados por el factor temperatura, se puede concluir que los materiales no se destacan uno del otro, es decir, que ninguna de las temperaturas 230 ° C, 250° C o 280° C aplicadas de manera individual en la torrefacción, muestran patrones comportamentales diferentes en el rendimiento masa, analizados de manera simultánea tanto en el material húmedo (HM) como en el seco (SM).

Los grupos de tiempo (80 min, 60 min y 40 min) a los cuales fueron expuestos los dos estados físicos del bagazo, (HM) y (SM), en el análisis global, tampoco mostraron diferencias significativas en sus medias estadísticas analizadas en el ANOVA, debido a ello se concluye que los tiempos de exposición a torrefacción de los materiales, tienen patrones comportamentales

similares en el rendimiento masa, es decir, ninguna tiempo tuvo diferencias en los resultados de rendimiento masa, analizados de manera simultánea tanto en el material húmedo (HM) como en el material seco (SM).

En el análisis local, el material húmedo (HM) evaluado tuvo diferencias significativas en cuanto al factor temperatura, del cual se identifica que el material HM tuvo mayor rendimiento masa cuando fue expuesto a 230° C; y en cuanto al factor tiempo, el material HM tuvo un resultado concordante de acuerdo a los minutos de duración del material HM a temperatura de 230 °C, el cual es de 80 minutos. Pero la incompleta volatilización del agua en la torrefacción del material húmedo (HM) mencionada anteriormente, hace que se descarte este tratamiento de 230° C por 80 minutos, ya que no se da una torrefacción completa en el material húmedo. Esto permite pensar en otros replanteamientos de aplicación de torrefacción, como el aumento del tiempo de exposición bajo la misma temperatura de 230° C.

El material seco (SM) evaluado localmente por factor temperatura, permite concluir que, sometiéndolo a una temperatura de 230° C, arroja una media de 70.21 ± 6.83 % alta en rendimiento masa, en comparación a las medias de rendimiento masa obtenidas de las otras temperaturas aplicadas. Los tiempos de exposición del material seco (SM) que tuvieron diferencias significativas fueron los de 60 min y 80 min frente al tiempo de exposición de 40 min, esto va en concordancia con el tiempo en el cual se aplicaron los 230° C, que fue de 80 min; se debe tener en cuenta que de acuerdo con el Post- hoc realizado, es indiferente si se aplica un tiempo de 80 minutos o un tiempo de 60 minutos al material seco (SM).

Lo anterior permite asumir parcialmente, que la temperatura adecuada para obtener un alto rendimiento masa del material de fique torrefactado, es de 230° C, con un secado previo al ingreso a la mufla en un horno a 105° C por 24 horas; con un tiempo de exposición de 80 minutos. Si se pretende disminuir el consumo energético de la mufla, se podría exponer el material a 60 minutos.

VII. TRABAJOS FUTUROS

Realizar Pruebas de torrefacción a las mismas temperaturas, 230° C, 250° C, 280° C con tiempos superiores a los desarrollados en este trabajo de grado, así estudiar cómo será el comportamiento del bagazo bajo una nueva condición de exposición.

Realizar estudios con el material de torrefacción obtenido, biochar, en pruebas agronómicas.

VIII. REFERENCIAS

[1] J. A. Pérez Mejía, *El fique su taxonomía cultivo y tecnología*, 2a ed. Colina, 1964.

[2] Vélez Clavijo, María Alejandra, Valentina Moreno Ramírez, and Alejandra Palacio Jaramillo, Ed., *Simulación dinámica de la cadena de producción de fique en Colombia para potenciar el desarrollo económico del país.* 2021.

[3] C. Mesa y J. Uribe, "Cambios generados en los suelos por la disposición de bagazo de fique", Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, 2009.

[4] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Cadena Agroindustrial del Fique", Gov.co, 2019. [En línea]. Disponible en: bit.ly/3XnrcLp.

[5] R. Echeverri, L. Franco, M. González, Fique en Colombia, 1.ª ed. Medellín, Colombia: Fondo Editorial ITM, 2015. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.22430/9789588743820

[6] Entrevista al líder de la Asociación de Fiqueros y Artesanos de la Cabuya del municipio de San Vicente Ferrer (AFAS), 2023.

[7] C. F. Valdés et al., "Thermochemical evaluation of fique bagasse waste (FBW) resulting from industrial processes as an energy precursor through combustion and gasification", *Biomass Convers. Biorefin.*, 2021.

[8] IDEAM. "El 40 por ciento del territorio colombiano tiene algún grado de erosión". Gov.co, (s.f). [En línea]. Disponible en: bit.ly/46fKAhB

[9] S. A. Ovalle-Serrano, C. Blanco-Tirado, y M. Y. Combariza, "Exploring the composition of raw and delignified Colombian fique fibers, tow and pulp", Cellulose, vol. 25, núm. 1, pp. 151–165, 2018.

[10] N. Montealegre, "Evaluación tecnoeconómica de la torrefacción de biomasa residual de la agroindustria de la palma de aceite en un horno rotatorio", Universidad Nacional, Bogotá, 2020.

[11] Y. M. Correa-Navarro, J. C. Moreno-Piraján, y L. Giraldo, "Processing of fique bagasse waste into modified biochars for adsorption of caffeine and sodium diclofenac", *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 39, núm. 4, pp. 933–948, 2022.

[12] A. M. Quinchía Figueroa, M. Carmona, y G. Tafurt, "Biosorption of Chlorothalonil on Fique's Bagasse (Furcraea sp.): Equilibrium and Kinetic Studies", jun. 2010.

[13] Biochar-international.org. [En línea]. Disponible en: https://biochar-international.org/about-ibi/.

[14] H. Escalante, L. Castro, P. Gauthier-Maradei, y R. Rodríguez De La Vega, "Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion", *Bioresour. Technol.*, vol. 219, pp. 80–90, 2016.

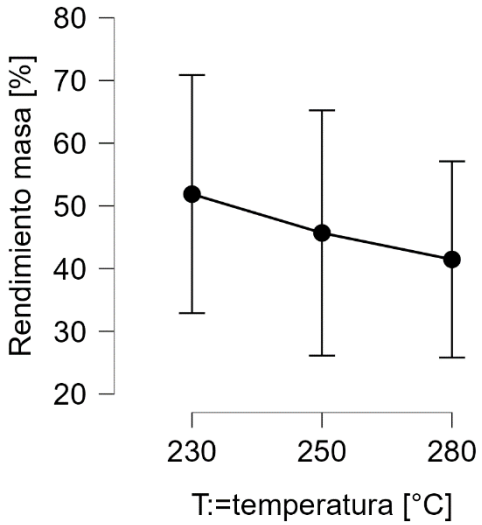
[15] P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Elsevier, 2013.

ANEXOS

Anexo A. ANOVA para el efecto de los materiales húmedo (HM) y seco (SM), con factor temperatura.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
T:=temperatura [°C]	549.03	2	274.52	0.43	0.66
Residuales	17374.30	27	643.49		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
18.38	2.00	27.00	< .001

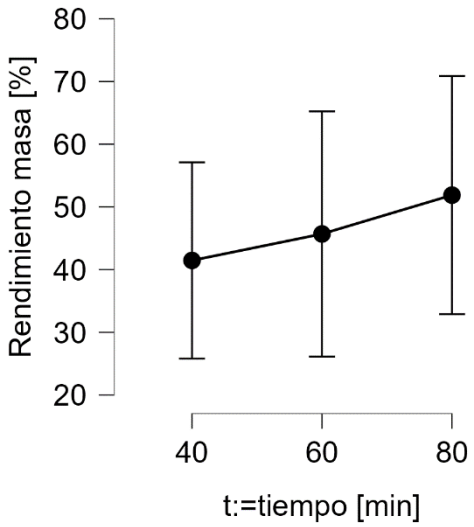
Comparaciones Post-hoc - T: =temperatura [°C]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
230	250	6.19	-21.94	34.32	11.34	0.55	0.85
	280	10.42	-17.71	38.55	11.34	0.92	0.63
250	280	4.23	-23.90	32.36	11.34	0.37	0.93

Anexo B. ANOVA para el efecto de los materiales húmedo (HM) y seco (SM), con factor tiempo.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	P
t:=tiempo [min]	549.03	2	274.52	0.43	0.66
Residuales	17374.30	27	643.49		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
18.38	2.00	27.00	< .001

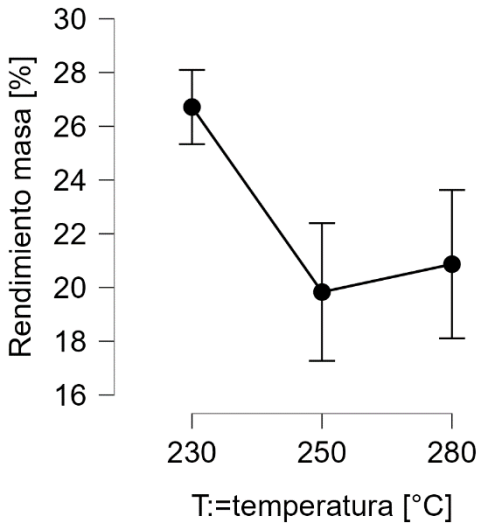
Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
40	60	-4.23	-32.36	23.90	11.34	-0.37	0.93
	80	-10.42	-38.55	17.71	11.34	-0.92	0.63
60	80	-6.19	-34.32	21.94	11.34	-0.55	0.85

Anexo C. ANOVA para el efecto del material húmedo (HM), con factor temperatura.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
T:=temperatura [°C]	137.77	2	68.88	19.78	< .001
Residuales	41.79	12	3.48		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	P
0.80	2.00	12.00	0.47

Comparaciones Post-hoc - T:=temperatura [°C]

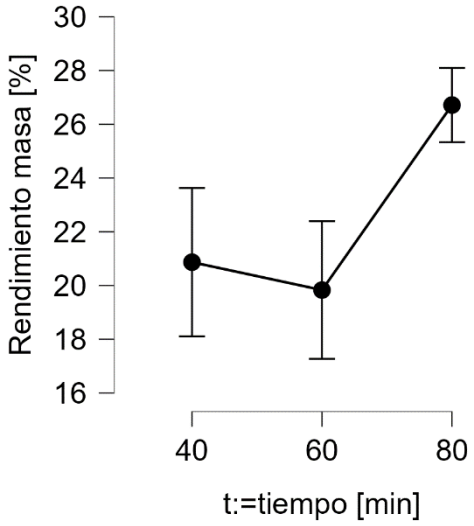
		Diferencia de Medias	IC del 95% para la Diferencia de Medias		ET	t	p_{Tukey}	
			Inferior	Superior				
230	250	6.88	3.74	10.03	1.18	5.83	< .001	***
	280	5.85	2.70	9.00	1.18	4.95	< .001	***
250	280	-1.04	-4.19	2.11	1.18	-0.88	0.66	

** p < .01, *** p < .001

Anexo D. ANOVA para el efecto del material húmedo (HM), con factor tiempo.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
t:=tiempo [min]	137.77	2	68.88	19.78	< .001
Residuales	41.79	12	3.48		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	P
0.80	2.00	12.00	0.47

Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

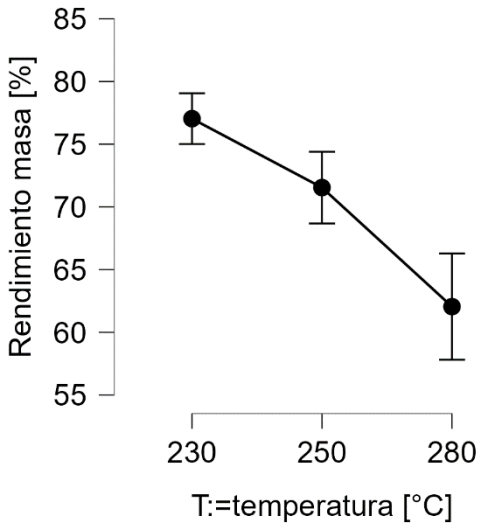
			IC del 95% para la Diferencia de Medias					
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}	
40	60	1.04	-2.11	4.19	1.18	0.88	0.66	
	80	-5.85	-9.00	-2.70	1.18	-4.95	< .001	***
60	80	-6.88	-10.03	-3.74	1.18	-5.83	< .001	***

** p < .01, *** p < .001

Anexo E. ANOVA para el efecto del material seco (SM), con factor temperatura.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
T:=temperatura [°C]	574.85	2	287.43	44.03	< .001
Residuales	78.34	12	6.53		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	P
6.55	2.00	12.00	0.01

Comparaciones Post-hoc - T:=temperatura [°C]

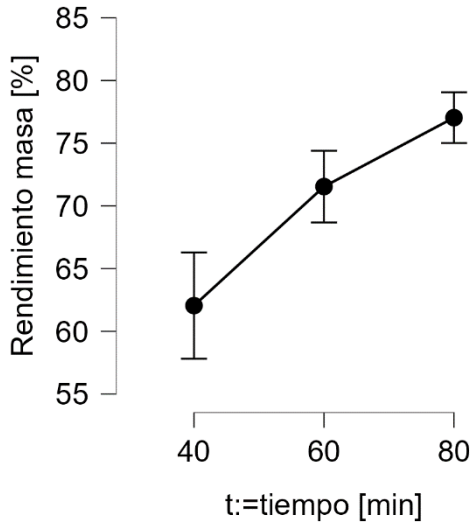
		Diferencia de Medias	IC del 95% para la Diferencia de Medias		ET	t	p_{Tukey}	
			Inferior	Superior				
230	250	5.50	1.18	9.81	1.62	3.40	0.01	*
	280	14.99	10.68	19.30	1.62	9.27	< .001	***
250	280	9.49	5.18	13.80	1.62	5.87	< .001	***

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Anexo F. ANOVA para el efecto del material seco (SM), con factor tiempo.

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
t:=tiempo [min]	574.85	2	287.43	44.03	< .001
Residuales	78.34	12	6.53		



Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	P
6.55	2.00	12.00	0.01

Comparaciones Post-hoc - t:=tiempo [min]

			IC del 95% para la Diferencia de Medias				
		Diferencia de Medias	Inferior	Superior	ET	t	p_{Tukey}
40	60	-9.49	-13.80	-5.18	1.62	-5.87	< .001 ***
	80	-14.99	-19.30	-10.68	1.62	-9.27	< .001 ***
60	80	-5.50	-9.81	-1.18	1.62	-3.40	0.01 *

* p < .05, ** p < .01, *** p < .001

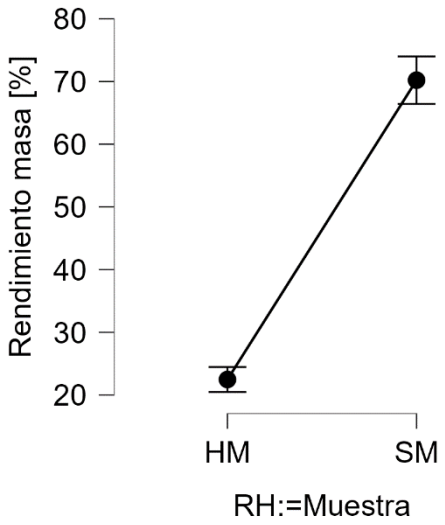
Anexo G. ANOVA para el efecto de los materiales húmedo (HM) y seco (SM).

Contraste de Igualdad de Varianzas (de Levene)

F	gl1	gl2	p
6.53	1.00	28.00	0.02

ANOVA - Rendimiento masa [%]

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p
RH:=Muestra	17090.58	1	17090.58	574.65	< .001
Residuales	832.75	28	29.74		



Comparaciones Post-hoc - RH:=Muestra

	Diferencia de Medias	IC del 95% para la Diferencia de Medias		ET	t	p_{Tukey}	
		Inferior	Superior				
HM SM	-47.74	-51.82	-43.66	1.99	-23.97	< .001	***

*** p < .001

Anexo H. Estadística descriptiva de la torrefacción de los materiales húmedo (HM) y seco (SM), analizado por temperatura.

Estadísticos Descriptivos	**Rendimiento masa [%]**		
	230° C	**250° C**	**280° C**
Válido	10	10	10
Moda [a]	25.61	16.87	17.70
Mediana	51.75	45.50	41.50
Media	51.88	45.69	41.46
Desviación Típica	26.55	27.33	21.87
Coeficiente de variación	0.51	0.60	0.53
Varianza	705.09	746.96	478.42
Asimetría	3.16×10^{-3}	2.17×10^{-3}	0.02
Error Típico de la Asimetría	0.69	0.69	0.69
Curtosis	-2.55	-2.53	-2.46
Error Típico de la Curtosis	1.33	1.33	1.33
Shapiro-Wilk	0.70	0.72	0.75
Valor de p de Shapiro-Wilk	< .001	1.57×10^{-3}	3.95×10^{-3}
Mínimo	25.61	16.87	17.70
Máximo	78.84	74.02	65.83
Primer cuartil	26.90	20.88	21.06
Segundo cuartil (mediana)	51.75	45.50	41.50
Tercer cuartil	76.79	70.54	59.92

[a] Existe más de una moda; solo se informa de la primera

Anexo I. Estadística descriptiva de la torrefacción de los materiales húmedo (HM) y seco (SM), analizado por tiempo.

Estadísticos Descriptivos	**Rendimiento masa [%]**		
	40 min	**60 min**	**80 min**
Válido	10	10	10
Moda [a]	17.70	16.87	25.61
Mediana	41.50	45.50	51.75
Media	41.46	45.69	51.88
Desviación Típica	21.87	27.33	26.55
Coeficiente de variación	0.53	0.60	0.51
Varianza	478.42	746.96	705.09
Asimetría	0.02	2.17×10^{-3}	3.16×10^{-3}
Error Típico de la Asimetría	0.69	0.69	0.69
Curtosis	-2.46	-2.53	-2.55
Error Típico de la Curtosis	1.33	1.33	1.33
Shapiro-Wilk	0.75	0.72	0.70
Valor de p de Shapiro-Wilk	3.95×10^{-3}	1.57×10^{-3}	< .001
Mínimo	17.70	16.87	25.61
Máximo	65.83	74.02	78.84
Primer cuartil	21.06	20.88	26.90
Segundo cuartil (mediana)	41.50	45.50	51.75
Tercer cuartil	59.92	70.54	76.79

[a] Existe más de una moda; solo se informa de la primera

Anexo J. Estadística descriptiva de la torrefacción de los materiales húmedo (HM) y seco (SM).

Estadísticos Descriptivos	**Rendimiento masa [%]**	
	HM	**SM**
Válido	15	15
Moda [a]	16.87	59.04
Mediana	21.11	70.79
Media	22.47	70.21
Desviación Típica	3.58	6.83
Coeficiente de variación	0.16	0.10
Varianza	12.83	46.66
Asimetría	0.15	-0.49
Error Típico de la Asimetría	0.58	0.58
Curtosis	-1.11	-1.06
Error Típico de la Curtosis	1.12	1.12
Shapiro-Wilk	0.94	0.91
Valor de p de Shapiro-Wilk	0.37	0.14
Mínimo	16.87	59.04
Máximo	28.28	78.84
Primer cuartil	20.68	65.76
Segundo cuartil (mediana)	21.11	70.79
Tercer cuartil	25.65	75.38

[a] Existe más de una moda; solo se informa de la primera