

¹Bagasse with a purpose: Evaluation of pyrolysis of sugarcane bagasse at 450°C and 800°C for energy use and its impact on the properties of biochar as an adsorbent

Bagazo con propósito: Evaluación de pirólisis del bagazo de caña de azúcar a 450°C y 800°C para uso energético y su impacto en las propiedades del biochar como adsorbente

Zharit Karina Guevara Ortiz ^a, David Esteban Orjuela Mayorga ^b
a. Student Department, Civil Engineer University (Bogotá, Colombia)
b. Student Department Civil Engineer University (Bogotá, Colombia)

Coautores

Dr. Rafael Alberto Fonseca Correa ^c

Ing. M. Sc. Néstor Fernando Penagos ^d

Ing. M. Sc. Baldomero Méndez Pallares ^e

✉: david-orjuela1@upc.edu.co

ABSTRACT: In Colombia, sugarcane bagasse is one of the most abundant agro-industrial residues, and when it is managed inefficiently, it generates both environmental and economic impacts. For this reason, this study evaluated the pyrolysis of bagasse as an alternative for producing biochar, using samples from three municipalities and processing temperatures of 450 °C and 800 °C, within the framework of the TransBioEnergy project at Universidad Piloto de Colombia. The process efficiency, volume reduction, and biochar morphology were assessed using ANOVA and scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that mass efficiency remains stable, while volume reduction and biochar structure improve at higher temperatures, showing greater homogeneity, which enhances its potential for environmental and adsorption applications.

KEY WORDS: Sugarcane bagasse; Biochar; Pyrolysis; Energy recovery; Agro-industrial residues.

RESUMEN: En Colombia, el bagazo de caña de azúcar es uno de los residuos agroindustriales más abundantes que, cuando se gestiona de manera ineficiente, genera impactos ambientales y económicos. Por esta razón, este trabajo evaluó la pirólisis del bagazo como alternativa para producir biochar, considerando muestras de tres municipios y temperaturas de 450 °C y 800 °C, en el marco del proyecto TransBioEnergy de la Universidad Piloto de Colombia. Así mismo, se estudiaron la eficiencia del proceso, la reducción de volumen y la morfología del biochar mediante ANOVA y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados muestran que la eficiencia másica se mantiene estable, mientras que la reducción de volumen y la estructura del biochar mejoran a mayor temperatura, evidenciando una mayor homogeneidad, lo que favorece su uso en aplicaciones ambientales y de adsorción.

PALABRAS CLAVE: Bagazo de caña de azúcar; Biochar; Pirólisis; Valorización energética; Residuos agroindustriales.

ORCID ID: Z. Guevara (<https://orcid.org/0009-0000-6276-9198>), E. Orjuela (<https://orcid.org/0009-0000-3654-4657>), R. Fonseca (<https://orcid.org/0000-0002-0779-534X>)

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de nuevos procesos sostenibles para el aprovechamiento de residuos agroindustriales ha cobrado gran importancia como una estrategia clave para mitigar y combatir los impactos ambientales que afronta este subproducto con el fin de fomentar modelos de producción circulares y hacer el aprovechamiento de estos residuos. Siendo el bagazo de caña de azúcar la materia prima a utilizar, es importante mencionar que este se destaca como uno de los residuos lignocelulósicos más abundantes en Colombia, producto del proceso de extracción de jugo de caña en los ingenios azucareros. A pesar de su alto potencial energético y estructural, gran parte de este residuo es desechado o subutilizado, lo que plantea la necesidad de promover procedimientos sostenibles y eficientes.

Específicamente, el proyecto de investigación enmarca la revalorización del bagazo de caña mediante procesos térmicos como lo es la pirólisis obteniendo como resultado biochar, material que es destacado por ser ampliamente empleado en procesos de adsorción, purificación y tratamiento de contaminantes. Particularmente se plantea un estudio experimental del bagazo de caña a 800°C con el fin de analizar las características estructurales del biochar obtenido mediante el proceso de carbonización, como lo son su porosidad, reducción volumétrica y estabilidad térmica; no obstante, se cuenta con trampas de gases que permiten controlar y caracterizar los gases generados para no afectar negativamente la atmósfera y el ambiente.

Una vez obtenidas y evaluadas las características físico-estructurales, se realizará una comparación directa con una muestra que fue tratada a 450°C mediante la investigación hecha por Jeimy Ramínez, estudiante de la Universidad Piloto de Colombia (1). Con el fin de identificar qué diferencias hay entre la carbonización de 800°C y 450°C y determinar la temperatura óptima que maximice la calidad del biochar y la posible pérdida energética entre las dos muestras evaluando una relación clara entre la temperatura de tratamiento, la evolución morfológica de las muestras y su aplicabilidad en sistemas de tratamiento ambiental.

La presente tesis se desarrolla en el marco de investigación TransBioEnergy en las investigaciones del grupo GUIAS de la Universidad Piloto de Colombia el cual ha promovido desde 2016 el estudio de tecnologías energéticas alternativas mediante el aprovechamiento de residuos locales y agrícolas como lo es el bagazo de caña de azúcar (2). Por tal motivo, se hace observación a que la propuesta tiene más enfoques aparte de los técnicos y científicos, como lo son los componentes sociales y ambientales, dado que, se busca satisfacer las necesidades de la disminución del subproducto agrícola en territorios rurales y comunidades que enfrentan desafíos de acceso energético y la gestión de residuos, aprovechando la valorización térmica mediante el proceso de pirólisis, siendo una alternativa viable y sostenible en los ámbitos de la ingeniería civil, ambiental y social.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Estudio de Caso

El presente estudio de caso se centra en el análisis experimental del bagazo de caña de azúcar como materia prima para la obtención de biochar mediante el proceso de pirólisis, con el objetivo de comparar las propiedades de este producido a 450°C y 800°C a partir de tres muestras de bagazo de caña provenientes de los municipios de San José de Pare, Pacho y Viani, con el

propósito de determinar cuál presenta mayores ventajas para su aprovechamiento como recurso energético o adsorbente, dentro del marco de aplicación de la tecnología Transbionergy.

En este contexto, es relevante mencionar que la tecnología Transbionergy, desarrollada desde 2016 por los grupos de investigación InnovaTIC y GUIAS de la Universidad Piloto de Colombia, se centra en transformar residuos agroindustriales como el bagazo de caña, en tecnologías energéticas alternativas, adaptables a comunidades rurales vulnerables. Esta iniciativa se encuentra alineada con el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 12 “Producción y consumo responsables” (3), particularmente con las metas 12.2, que busca lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales; 12.4, orientada a lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y desechos; y 12.5 que promueve reducir significativamente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (3). De esta manera, el proyecto TransBioEnergy no solo contribuye a la valorización energética del bagazo de caña, sino que también se enmarca en un enfoque de sostenibilidad integral, integrando aspectos ambientales, sociales y tecnológicos en las comunidades donde se implementa.

Ahora bien, la elección de los municipios San José de Pare, Pacho y Vianí se fundamenta en la disponibilidad significativa de bagazo de caña de azúcar. Esto teniendo en cuenta que según las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA 2021), la producción nacional de caña panelera alcanza aproximadamente 12.4 millones de toneladas distribuidas en 230.682 hectáreas cultivadas. De las cuales el 54.9% se concentra en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander y Antioquia, que en conjunto aportan 6.8 millones de toneladas anuales. Sin embargo, es importante precisar que en particular, Boyacá y Cundinamarca aportan entre el 12% y 14% de la producción nacional, manteniendo un rendimiento entre 51 t/ha (4). Por esta razón, las muestras analizadas en el presente trabajo provienen de municipios pertenecientes a los departamentos de Cundinamarca (Vianí y Pacho) y Boyacá (San José de Pare).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la ilustración 1 correspondiente a la gráfica de aptitud del suelo para cultivo comercial de caña panelera y los datos proporcionados por la UPR (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria) a través de sus portales SIG y servicios web, el municipio de San José de Pare cuenta con aproximadamente el 70% del suelo apto para el cultivo de caña panelera, Pacho cuenta con el 91% de suelo no apto para este cultivo y Vianí tiene aproximadamente la misma proporción de suelo apto como no apto (5). Esta diversidad de condiciones dentro del territorio de análisis permite evaluar el comportamiento del bagazo de caña proveniente de diferentes contextos, lo cual permite el análisis comparativo entre las muestras y amplía la representatividad del estudio.

Tabla 1

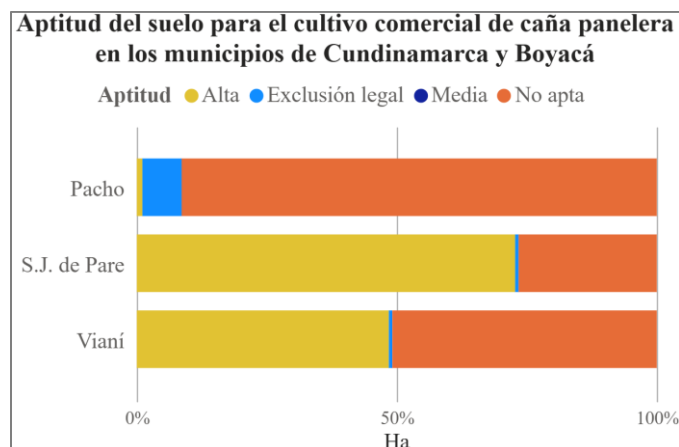
Aptitud del suelo para el cultivo comercial de caña panelera en los municipios de Cundinamarca y Boyacá

Departamento	Municipio	Hectárea por Aptitud			
		Alta	Media	Exclusión legal	No apta
Boyacá	S.J. de Pare	5269.77	0.000	48.360	1924.250
Cundinamarca	Pacho	436.11	0.000	3060.030	37032.510
Cundinamarca	Vianí	3238.2	2.030	43.28	3396.54

Nota: Los datos se obtuvieron de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria.

Ilustración 1

Aptitud del suelo para el cultivo comercial de caña panelera en los municipios de Cundinamarca y Boyacá



Nota: Los datos se obtuvieron de la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria.

Además, estos municipios mantienen una actividad panelera activa, con la presencia de trapiches paneleros que se han establecido como el sustento económico de las familias de la región, lo que garantiza la disponibilidad de la materia prima. Así mismo, la viabilidad del desarrollo de la tecnología Transbionergy en las zonas mencionadas anteriormente, se fundamenta en la situación socioeconómica de esta población rural, que se encuentra en condiciones de vulnerabilidad social y económica. Es así como, según el último censo realizado en 2028 por el DANE el municipio de Sam José de Pare tiene un índice de pobreza multidimensional (IPM) de 57.1; Pacho de 39.6; y Vianí de 41 en sus zonas rurales, es decir, el IPM de estos municipios supera el promedio nacional en las zonas rurales que es de 24.3 de acuerdo con el DANE (6). Por esta razón, la implementación de tecnologías como TransBioEnergy no solo contribuye a la valorización energética de residuos locales, sino que también fortalece el desarrollo económico y ambiental de las comunidades, alineándose con políticas de economía circular y sostenibilidad rural.

Por otra parte, es importante mencionar que esta problemática y la forma de abordarla que se plantea no son exclusivas del contexto colombiano. Esto teniendo en cuenta que, en países como Brasil, Tailandia e Indonesia (7) (8) (9), se han desarrollado procesos similares de transformación de bagazo de caña para obtener biochar y carbones activados para su aprovechamiento, evaluando sus propiedades adsorbentes, destacando la influencia de parámetros como la temperatura, la velocidad de calentamiento y la atmósfera de reacción sobre el producto obtenido (10)(11)(12) Lo que permite posicionar el aprovechamiento térmico del bagazo de caña colombiano dentro de una tendencia global de valorización energética sostenible.

Considerando lo expuesto anteriormente, este proyecto se desarrolló en condiciones controladas de laboratorio, enfocándose en la transformación térmica del bagazo de caña de azúcar a través de un proceso de pirólisis a 800 °C. Para esto, se emplearon muestras recolectadas en los municipios de Moniquirá (Boyacá), Pacho y Vianí (Cundinamarca), con el objetivo de obtener biochar y evaluar sus propiedades físicoquímicas, comparándolas con las de muestras tratadas previamente a 450 °C. Dicho tratamiento fue realizado en el trabajo de grado titulado *Evaluación de la pirólisis de 3 muestras de biomasa de bagazo de caña como potencial material lignocelulósico para ser utilizado en el paquete tecnológico TransBioEnergy* elaborado por Jeimy Katherine Ramírez Romero en la Universidad Piloto de Colombia (2024). Esto con el fin de lograr establecer qué temperatura favorece a un mayor rendimiento o mejor comportamiento del biochar para uso energético o adsorbente en el marco de aplicación de la tecnología TransBioEnergy.

2.2 Flujo de Trabajo Experimental

El desarrollo de la investigación se organizó en 4 etapas, donde se presenta el flujo general del proceso experimental, partiendo de la preparación del bagazo, para posteriormente hacer el montaje y la ejecución del proceso de pirolisis, después el cálculo de parámetros y análisis de propiedades, para finalmente lograr la comparación de resultados y la evaluación de desempeño del biochar sometido a diferentes temperaturas durante el proceso de pirolisis.

2.3 Preparación Del Material Y Proceso De Pirolisis

Para la preparación del material, primero las muestras se secaron a 60°C durante 24 horas para eliminar la humedad inicial. Posterior a esto, se tamizaron las muestras buscando una granulometría homogénea entre 80 y 150 µm, lo cual favorece una distribución térmica más uniforme durante el proceso de pirolisis. Este intervalo de tamaño ha sido empleado en estudios previos de activación térmica de materiales lignocelulósicos con el objetivo de estandarizar las condiciones de tratamiento (13).

El tratamiento térmico se realizó en un horno tubular vertical, al cual se conectó una línea de nitrógeno que actuó como gas inerte, evitando combustión. Además, el horno estaba programado para subir la temperatura a razón de 5 °C por minuto, hasta alcanzar los 800 °C, temperatura que se mantuvo constante durante 60 minutos. Asimismo, durante todo el proceso se mantuvo un flujo continuo de nitrógeno a 5 ml/min.

Por otra parte, también es importante mencionar que se dispuso de trampas de gases con soda cáustica que permitieron capturar los volátiles y así evitar que estos se liberaran al ambiente. Finalmente, el reactor se dejó enfriar naturalmente bajo la misma atmósfera inerte y el biochar recolectado fue almacenado en frascos herméticos o desecadores para conservarlo hasta su caracterización.

2.4 Cálculo de Parámetros

Se realizaron los siguientes cálculos para cada una de las muestras tratadas:

2.4.1 Porcentaje de eficiencia del proceso de obtención del carbón

$$\%R_{oE} = \frac{P_f \times 100}{P_i} \quad [1]$$

Donde:

$\%R_{oE}$: Porcentaje de rendimiento o eficiencia del proceso

P_f : Peso final de la muestra con el proceso de pirolisis

P_i : Peso inicial de la muestra antes del proceso de pirolisis

2.4.2 Reducción de volumen de la muestra

$$\%R_v = 100 - \frac{V_f \times 100}{V_i} \quad [2]$$

$\%R_v$: Porcentaje de reducción de volumen

V_f : Volumen final de la muestra con el proceso de pirolisis

V_i : Volumen inicial de la muestra antes del proceso de pirolisis

2.5 Caracterización del Biochar

2.5.1 Análisis SEM

Además de los análisis fisicoquímicos básicos, se realizó el análisis morfológico del biochar mediante microscopía electrónica del barrido (SEM). Lo cual permitió observar la estructura superficial del biochar, identificar la presencia de poros y evaluar el efecto que tuvo la temperatura sobre la textura del material.

Asimismo, empleando la herramienta FIJI (Image J) para el procesamiento digital de las micrografías, se determinó el porcentaje de cenizas y fibra residual mediante un macro con el que se automatizó la conversión de imágenes, la aplicación de filtros, el umbralado, la separación de partículas y el análisis cuantitativo de las áreas correspondientes a las fases observadas.

2.5.2 Análisis Estadístico de los Datos

Se utilizó la herramienta Microsoft Power BI, a través de la cual se construyeron los elementos gráficos comparativos para cada una de las variables analizadas, con el fin de facilitar su respectivo análisis. Asimismo, se llevó a cabo un análisis ANOVA de un factor, con el fin de evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los biochars provenientes de diferentes zonas (Moniquirá, Pacho y Vianí).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros

3.1.1 Porcentaje de eficiencia del proceso de obtención del biochar

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para el porcentaje de eficiencia del proceso de obtención del biochar, evaluado para los tres municipios a dos temperaturas diferentes (450°C y 800°C).

Tabla 2

Porcentaje de eficiencia del proceso de obtención del biochar

Muestra	T (°C)	Peso _i (g)	Peso _f (g)	Eficiencia del proceso (%)
S.J. de Pare / Moniquirá	450	32.738	7.984	24.388
	800	33.782	8.074	23.900
Pacho	450	47.734	9.638	20.191
	800	33.67	7.528	22.358
Vianí	450	29.869	8.801	29.465
	800	28.64	6.735	23.516

Nota: autoría propia.

Asimismo, en la ilustración 2 se observa una tendencia general a la disminución de la eficiencia con el aumento de la temperatura. Teniendo en cuenta que las muestras tratadas a 800°C presentan eficiencias más bajas, con diferencias menos marcadas en comparación con las muestras tratadas a 450°C. También es preciso mencionar que, en el municipio de Vianí, la diferencia entre temperaturas es más pronunciada, mientras que en Moniquirá y Pacho los porcentajes se mantienen cercanos. Lo que sugiere una posible influencia de las características fisicoquímicas del bagazo de caña recolectado en cada municipio.

3.1.2 Reducción de volumen de la muestra

Ahora bien, los resultados obtenidos para la reducción del volumen de cada muestra de acuerdo con la temperatura (450°C y 800°C) se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Reducción de volumen de la muestra

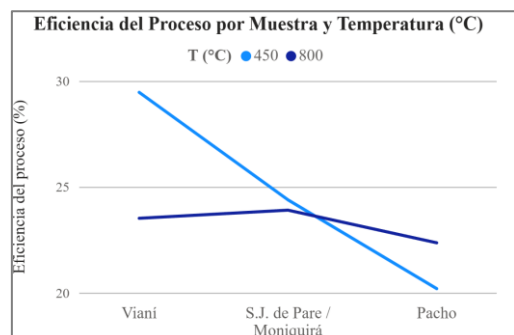
Muestra	T (°C)	Volumen _i (ml)	Volumen _f (ml)	Reducción de Volumen (%)
S.J. de Pare / Moniquirá	450	350	150	57.143
	800	450	125	72.222
Pacho	450	350	150	57.143
	800	550	105	80.909
Vianí	450	350	175	50.000
	800	550	150	72.727

Nota: autoría propia.

A su vez, en la ilustración 3 se observa que, en general la mayor reducción de volumen se presenta a 800°C en todas las muestras. Asimismo, la muestra de Pacho presenta la mayor reducción de volumen a 800°C alcanzado un 80.91%, mientras que a 450°C presenta una reducción del 57.14%. Por otra parte, se evidencia que, a 800°C la que menor reducción del volumen corresponde a Moniquirá, mientras que, 450°C es la muestra de Vianí la que representa la menor reducción del volumen.

Ilustración 2

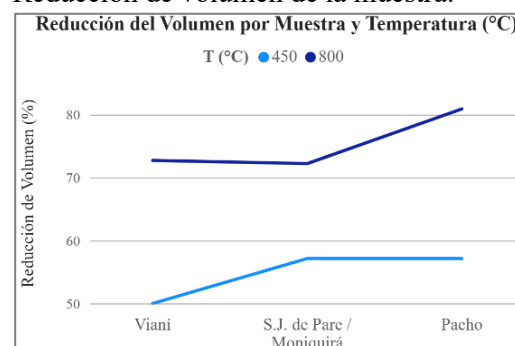
Eficiencia en la obtención del biochar



Nota: autoría propia.

Ilustración 3

Reducción de volumen de la muestra.

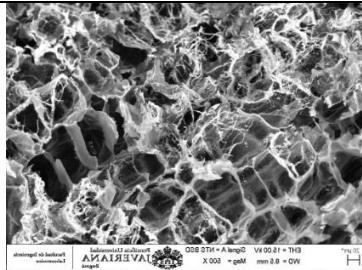
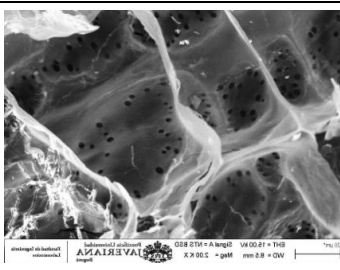
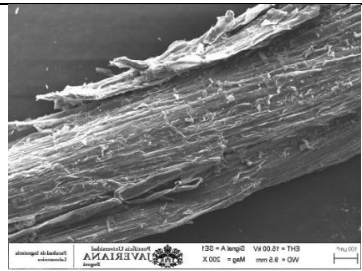
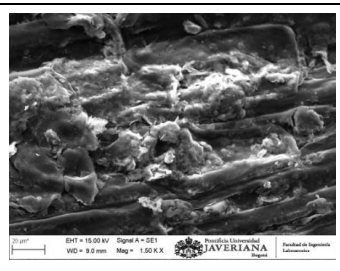
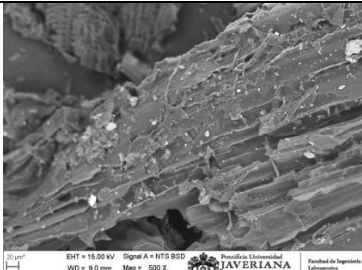
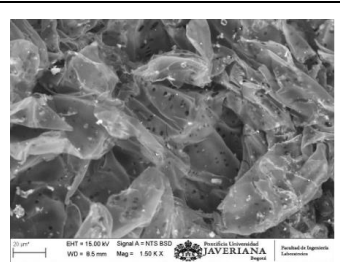


Nota: autoría propia.

3.2 Caracterización del Biochar

2.5.3 Análisis SEM

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitió obtener las micrografías que permiten observar la morfología superficial de las muestras de biochar obtenidas por el proceso de pirólisis de muestras de caña de azúcar de los municipios de Pacho, San José de Pare y Vianí, como se evidencia en las ilustraciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

	
Ilustración 4. Pacho 450°	Ilustración 5. Pacho 800°
	
Ilustración 6. S.J. de Pare 450°	Ilustración 7. S.J. de Pare 800°
	
Ilustración 8. Viani 450°	Ilustración 9. Viani 800°

Asimismo, en la tabla 4 se muestra los resultados obtenidos empleando la herramienta FIJI (Image J) para el procesamiento digital de las micrografías. Donde se logró evidenciar diferencias en la textura superficial de las muestras según la temperatura aplicada; es así como a 450°C, las muestras presentan una superficie con más porcentaje de cenizas y fibra residual, lo que se relaciona con los bajos porcentajes de biochar obtenidos, especialmente en Pacho (37.45%). Por el contrario, a 800°C se evidencia un aumento de uniformidad, coherente con el incremento de contenido de bichar en pacho (59.91%). Lo que sugiere que, a mayor temperatura de pirólisis, se optimiza mejor la estructura del material y con ello su potencial adsorbente.

Tabla 4
Análisis SEM

Muestra	T (°C)	%Cenizas y fibra residual	%Biochar
S.J. de Pare / Monquirá	450	62.550%	37.450%
	800	40.086%	59.914%
Pacho	450	18.456%	81.544%
	800	19.499%	80.501%
Viani	450	10.650%	89.350%
	800	10.842%	89.158%

Nota: autoría propia.

3.3 Análisis ANOVA

3.3.1 Porcentaje de eficiencia del proceso de obtención del biochar

Teniendo en cuenta la tabla 5, se puede evidenciar de acuerdo con el análisis ANOVA que, no hay diferencias estadísticamente significativas entre los municipios ni entre las temperaturas. Esto teniendo en cuenta que los valores p obtenidos son mayores al nivel de significancia 0.05, es decir, la eficiencia no está relacionada directamente a ninguna de las variables presentadas.

Tabla 5
ANOVA porcentaje de eficiencia

Fuente de Variación	SC	gl	CM	F	P-Valor	F crítico
Filas	27.298	2	13.649	1.594	0.386	19.000
Columnas	3.038	1	3.038	0.355	0.612	18.513
Error	17.126	2	8.563	-	-	-
Total	47.462	5	-	-	-	-

Nota: autoría propia.

3.3.2 Reducción de volumen de la muestra

De acuerdo con la tabla 6, donde se presenta el análisis de dos factores con una sola muestra por grupo, es pertinente decir que, las diferencias entre municipios no son estadísticamente significativas ($p=0.276$), es decir, la reducción de volumen no varía de forma significativa entre los diferentes municipios. Sin embargo, la temperatura sí tiene un efecto significativo sobre la reducción de volumen ($p=0.0173$).

Tabla 6
ANOVA porcentaje de reducción

Fuente de Variación	SC	gl	CM	F	P-Valor	F crítico
Filas	59.061	2	29.531	2.624	0.276	19.000
Columnas	631.870	1	631.870	56.153	0.017	18.513
Error	22.505	2	11.253	-	-	-
Total	713.436	5	-	-	-	-

Nota: autoría propia.

4. CONCLUSIONES

El análisis estadístico ANOVA permitió identificar de manera clara cómo la temperatura y el origen del bagazo influyen sobre el comportamiento del proceso de pirólisis. En primer lugar, en relación con el porcentaje de eficiencia, los resultados no mostraron diferencias significativas entre las temperaturas de 450 °C y 800 °C, ni entre los municipios analizados. Esto indica que el incremento térmico no genera un impacto relevante en la eficiencia global del proceso, lo que sugiere que la conversión másica del material se mantiene relativamente constante bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, el análisis aplicado a la reducción de volumen sí evidenció un efecto significativo con respecto a la temperatura, aunque no entre los municipios, lo cual demuestra que el calentamiento promueve una contracción estructural más pronunciada sin depender del origen del bagazo. Este comportamiento está relacionado con la pérdida progresiva de componentes volátiles y la transformación de la matriz lignocelulósica en estructuras carbonosas más densas y estables.

Estos resultados se complementan con los hallazgos obtenidos mediante el análisis morfológico conocido como barrido microscópico electrónico (SEM), donde las imágenes muestran diferencias notorias en la microestructura entre las muestras tratadas a 450 °C y las expuestas a 800 °C. A temperaturas más altas, la superficie del biochar presenta una estructura más homogénea, una red de microporos bien definida y una textura superficial más limpia, coincidiendo con la disminución del contenido de cenizas y residuos fibrosos. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Agrawal et al. (14), quienes evidencian que el incremento térmico durante la pirólisis, genera un reordenamiento aromático más completo en la matriz del carbono, promoviendo estructuras con mayor área superficial y estabilidad térmica. De manera similar, los resultados coinciden con lo planteado por Jamilatun et al.(15), quienes destacan que a temperaturas superiores a 700 °C se produce una formación más desarrollada de poros y una reducción significativa de impurezas superficiales, lo que optimiza las características morfológicas del biochar y mejora su potencial para aplicaciones de carácter energético y ambiental.

En este sentido, se confirma que el proceso de pirólisis presenta un comportamiento dual, teniendo en cuenta que mientras el rendimiento porcentual del biochar se mantiene constante, la calidad estructural mejora con el aumento de la temperatura. Dentro del marco del proyecto TransBioEnergy, este hallazgo cobra especial relevancia, dado que permite establecer que la optimización del proceso no debe basarse únicamente en la cantidad de biochar producido, sino en la calidad funcional y morfológica del material obtenido. La mayor porosidad, homogeneidad y estabilidad observadas en las muestras tratadas a 800 °C amplían su potencial de aprovechamiento en procesos de valorización energética y ambiental.

Además, los resultados se alinean con lo expuesto por Zafeer et al. (16), quienes señalan que el desempeño del biochar no depende exclusivamente del rendimiento másico, sino de la estructura interna, la estabilidad de los enlaces carbonosos y la capacidad del material para mantener una red porosa y funcional en condiciones variables. Esto refuerza la idea de que la calidad estructural debe considerarse como un parámetro determinante en la evaluación de materiales carbonosos.

De manera general, el análisis experimental y estadístico evidencia que, aunque la temperatura no afecta significativamente la eficiencia ni la masa recuperada, sí influye de manera directa en la morfología y en las propiedades finales del biochar. Este comportamiento pone de manifiesto que la eficiencia térmica y la calidad estructural no evolucionan necesariamente de forma paralela, por lo que futuras investigaciones dentro del proyecto TransBioEnergy deberían orientarse hacia la búsqueda de un equilibrio entre rendimiento, consumo energético y calidad del producto final. Así mismo, los resultados de este estudio contribuyen al desarrollo de metodologías de pirólisis más eficientes y sostenibles, optimizando la valorización del bagazo de caña de azúcar como recurso energético, funcional y ambientalmente viable.

Agradecimientos

Gracias al laboratorio de calorimetría y sólidos porosos de la Universidad Nacional Sede Bogotá.

Declaración de contribución de autoría

Esteban Orjuela: Traducción, Redacción – borrador original.

Néstor Fernando Penagos: Redacción – revisión y edición.

Rafael Alberto Fonseca: Conceptualización, Supervisión, Metodología, Validación.

Baldomero Pallares: Redacción – revisión y edición.

Zharit Guevara: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – borrador original.

REFERENCIAS

- (1) Ramirez J, Fonseca R, Penagos N, Méndez B. 2024. Evaluación De La Pirólisis De 3 Muestras De Biomasa De Bagazo De Caña Como Potencial Material Lignocelulósico Para Ser Utilizado En El Paquete Tecnológico Transbioenergy. Universidad Piloto de Colombia.
- (2) Universidad Piloto de Colombia. 2016. TransBioEnergy. TransBioEnergy.
- (3) ONU. 2015. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTEBLE. Naciones Unidas – Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (UN DESA).
- (4) Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Agronet Colombia. Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA 2021): Boletín de producción de caña panelera – Primer semestre 2022. 2022.
- (5) Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA. Mapa de aptitud del suelo para el cultivo comercial de caña panelera en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2023.
- (6) Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2020. Medida de pobreza multidimensional municipal de fuente censal 2018.
- (7) Oliveira MA et al. 2025. Biochar Derived from Sugarcane Bagasse for Adsorption of Anionic and Cationic Dyes. *Materials Research*; 28. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0179>
- (8) Sutthasupa S et al. 2023. Sugarcane bagasse-derived granular activated carbon hybridized with ash in bio-based alginate/gelatin polymer matrix for methylene blue adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*; 253(100755):127464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127464>
- (9) Hidayat A, Kurniawan W, Hinode H. 2021. Sugarcane bagasse biochar as a solid catalyst: From literature review of heterogeneous catalysts for esterifications to the experiments for biodiesel synthesis from palm oil industry waste residue. *Indonesian Journal of Science and Technology*; 6(2):337–352. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i2.34498>
- (10) Toscano Miranda N, Lopes Motta I, Maciel Filho R, Wolf Maciel MR. 2021. Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ;149:111-394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111394>
- (11) Sharma P et al. 2024. Review on recent advancement of adsorption potential of sugarcane bagasse biochar in wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*; 206:428–439. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.04.055>
- (12) Kakom SM, Abdelmonem NM, Ismail IM, Refaat AA. 2023. Activated Carbon from Sugarcane Bagasse Pyrolysis for Heavy Metals Adsorption. *Sugar Tech*; 25(3):619–629. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01214-3>
- (13) Guarín O-, Buitrago-Sierra VM;, López-López R;, Diana P. 2014. Sistema de Información Científica. Vol 17 2014. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344233949008>
- (14) Pradeep K. Agrawal, J.P. Chakraborty, D.S. Ramteke. 2013. Evolution of the Morphology of Chars From Pyrolysis of Sugarcane Bagasse. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*; 35.
- (15) Jamilatun S et al. 2023. Preparation and Characteristics of Effective Biochar Derived from Sugarcane Bagasse as Adsorbent. Vol 13.
- (16) Zafeer MK, Menezes RA, Venkatachalam H, Bhat KS. 2024. Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review. *Emergent Materials*; 7(1):133–161. <https://doi.org/10.1007/s42247-023-00603-y>