

## Aplicación del proceso de carbonización hidrotérmica a los residuos del café (borra), para la obtención de un biocarbón

Leonardo Alberto Nieto-Ruiz, Norma Alejandra Vallejo-Cantú\* y Alejandro Alvarado-Lassman.

<sup>1</sup> Laboratorio de Ingeniería Ambiental I, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

\* Autor de correspondencia: [norma.vc@orizaba.tecnm.mx](mailto:norma.vc@orizaba.tecnm.mx)

**Desarrollo Sustentable** (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos). **Ponencia Presencial.**

Recibido: 16 de junio de 2023

Aceptado: 5 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

**Resumen:** En los últimos años, se ha impulsado la investigación de tecnologías más eficientes y confiables para la explotación y conversión de energía de biomasa residual hacia materiales valiosos. Este trabajo de investigación se centra en los resultados de la carbonización de los residuos del café obteniendo un biocarbón o hidrochar. Para la obtención del biocarbón se utilizaron 3 tipos de residuos de café, para el proceso de carbonización se utilizó un reactor automatizado con calentamiento propio de acero inoxidable y medición controlada, el cual tiene la capacidad de 1 litro, a cada tipo de residuo de café se le realizaron procesos de carbonización a temperaturas de 175, 185 y 200 °C y tiempos de residencia de 1, 2 y 3 h. El mayor rendimiento de biocarbón se obtuvo a temperatura de 185 °C y 1 h de tiempo de residencia con un rendimiento de 31.43 % en base seca. Las condiciones de operación y el tipo de residuo de café afectan el rendimiento del biocarbón.

**Palabras clave:** Carbonización; biocarbón; hidrochar; HTC.

## Application of the hydrothermal carbonization process to coffee waste (borra), to obtain biochar

**Abstract:** In recent years, research into more efficient and reliable technologies for the exploitation and conversion of energy from residual biomass to valuable materials has been promoted. This research work focuses on the results of the carbonization of coffee residues obtaining a biochar or hydrochar. Afolabi et al. (2020) analyzed the hydrocarbonization process (CHT) for used coffee beans (SCG), under optimal conditions it obtained a maximum yield of hydrochar close to 64%. To obtain biochar, 3 types of coffee residues were used, for the carbonization process an automated stainless steel reactor with its own heating and controlled measurement was used, which has a capacity of 1 liter, for each type of coffee residue. carbonization processes were carried out at temperatures of 175, 185 and 200 °C and residence times of 1, 2 and 3 hours. The highest yield of biochar was obtained at a temperature of 185 °C and 1 hour of residence time with a yield of 31.43 % on a dry basis. Operating conditions and the type of coffee residue affect biochar yield.

**Keywords:** Carbonization; biochar; hidrochar; HTC.

### Introducción

El aumento constante del consumo energético mundial junto con la disminución paralela de los depósitos de combustibles fósiles, ha llevado a la comunidad científica hacia la investigación de fuentes más sostenibles (Zhang *et al.*, 2018). Por otro lado, los residuos sólidos orgánicos poseen alto contenido de humedad y complejidad en la materia orgánica, lo cual genera un problema para eliminar este tipo de biomasa (Fernández *et al.*, 2015).

Después de utilizar el café molido en una percoladora, donde se extrae su sabor y aroma, se genera un residuo de café comúnmente llamado borra, estos se depositan en los residuos sólidos urbanos o municipales. México genera 96 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos o municipales cada año, de los cuales el 25 % (24 millones de toneladas) son residuos orgánicos que no se aprovechan como valor agregado, de los cuales solo 15,000 toneladas son de los residuos resultantes del café (Soluciones para el Desarrollo Sustentable, 2018). Resulta conveniente buscar técnicas que permitan no sólo reducir costos de la eliminación de biomasa sino también generar productos valorizables y útiles a partir de este tipo de residuos, es por ello que la carbonización hidrotérmica se presume factible para afrontar esta situación. El proceso de HTC aún no se entiende por completo, pero es posible analizarlo de manera general. Un ejemplo claro de una molécula presente en gran cantidad en los residuos orgánicos es la celulosa que al entrar en el procesos de hidrocarbonización inicia con la reacción de hidrólisis en donde la molécula de agua se divide y rompe el enlace químico de la celulosa para formar la glucosa, posteriormente sucede la reacción química de deshidratación en la cual se elimina el agua permitiendo que la descomposición térmica del sacárido dé como resultado un

Hidroximetilfurfural (HMF), luego estos compuestos se agrupan y generan anillos aromáticos en cadena en las reacciones de polimerización y aromatización, para finalmente presentar una condensación intramolecular donde se permite que las partículas se agrupen para formar la estructura del carbón con compuestos oxigenados. (Maniscalco *et al.*, 2020). Afolabi *et al.* (2020) determinaron que el proceso de hidrogenación de hidrocarburos (CHT) de los granos de café gastados (SCG) se analizaron utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM) para comprender la interacción de la temperatura de reacción y el tiempo de residencia y optimizarlos para producir hidrocarbón del SCG con un rendimiento y valor calorífico óptimos. Se evaluaron las propiedades del combustible y el comportamiento de combustión del hidrocarbón para determinar su idoneidad para reemplazar el carbón en aplicaciones energéticas. Dependiendo de las condiciones de operación, el contenido atómico de carbono y el poder calorífico en el hidrocarbón aumentaron de 11.2 a 30.7 % y de 15.8 a 44.7 %, respectivamente. El hidrocarbón tiene un valor calorífico máximo de 33.5 MJ/kg, similar a la antracita y los carbones térmicos secos que se usan comúnmente en el Reino Unido. En condiciones óptimas alrededor de 216 °C y 1 h, se obtuvo un rendimiento máximo de hidrocarbón cercano al 64 %. Las dos especies más importantes de café desde el punto de vista económico son el *Coffea arabica* (café Arábica) (que supone más del 60 % de la producción mundial) y el *Coffea canephora* (café Robusta). El objetivo principal de este proyecto de investigación es evaluar la aplicación del proceso de carbonización a los residuos del café percolado conocido como borra de café para la obtención de un biocarbón.

## Materiales y Métodos

La obtención de la materia prima con la que se trabajó en el proyecto fue recolectada de diferentes cafeterías de la región, del residuo que genera una percoladora de café, este se trasladó al Laboratorio de Ingeniería Ambiental 1 del Instituto Tecnológico de Orizaba, en bolsas de 250 g de polipropileno debidamente etiquetadas con sello hermético, esto para evitar algún escurrimiento o contaminación del producto, el primer tipo de residuo de café que se utilizó fue de la marca Toka Premium de la especie *Coffea arabica*, obtenido de la cafetería que se encuentra dentro de las instalaciones del Tecnológico Nacional de México campus Orizaba. El segundo tipo de residuo de café que se utilizó fue de la marca Cafiver House Blend Gourmet, también de la especie *Coffea arabica*, obtenido de la cafetería “Cafiver”. El tercer tipo de residuo de café que se utilizó fue de la marca Lunas de Café, con una combinación entre especies arábica/robusta, obtenido de la cafetería “Lunas de Café”.

La caracterización de los residuos es necesaria para identificar cantidades y variaciones, ya que la materia prima fue usada en el proceso era diferente de acuerdo a la marca y su especie, cada método se describe de manera general en la Tabla 1.

Tabla 1. Métodos para la caracterización del residuo

Análisis	Método o Norma de prueba
% Humedad	NMX-AA-16-1984.
ST y SV	NMX-AA-034-SCFI-2001
Cenizas	Método gravimétrico 2540 ESM
pH	Método potenciométrico 4500-H <sup>+</sup> B de Standard Methods

La carbonización hidrotérmica o hidrocarbonización se realizó en un reactor automatizado con calentamiento propio de acero inoxidable, el cual tiene la capacidad de 1 L, y las condiciones del mismo tienen una medición controlada, todo esto se realizó para analizar el comportamiento y los resultados del proceso a diferentes valores de temperatura y tiempo. En la parte experimental se varió la temperatura y el tiempo, la relación sólido-agua será 1:1 para poder obtener diferentes biocarbones y así analizar el proceso a diversas condiciones de operación, las cuales están definidas en la Tabla 2

Tabla 2 Condiciones de operación para la hidrocarbonización de los residuos del percolado del café.

Especie	Variedad de café elegida			Relación Sólido-Agua	Tiempo
1 (Tolka)	T-175	T-175	T-175	1:1	1 h
	T-185	T-185	T-185		
	T-200	T-200	T-200		
2 (Cafiver)	C-175	C-175	C-175	1:1	2 h
	C-185	C-185	C-185		
	C-200	C-200	C-200		
3 (Lunas de café)	LC-175	LC-175	LC-175	1:1	3 h
	LC-185	LC-185	LC-185		
	LC-200	LC-200	LC-200		

Para la caracterización de los biocarbonos obtenidos a las diferentes condiciones, se realizarán los mismos análisis que en la caracterización del residuo, con el fin de observar el cambio después del proceso.

### Resultados y Discusión

Los resultados de los análisis de la caracterización del residuo de percolación de café, se presentan en las Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5, para cada tipo de café respectivamente, obteniendo los siguientes datos:

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del primer tipo de residuo de café.

Lote	Humedad	ST (%)	SV	Cenizas	pH
1	69.24	30.76	98.87	1.13	6.23
2	73.75	26.25	98.34	1.66	5.33

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del segundo tipo de residuo de café.

Lote	Humedad	ST (%)	SV	Cenizas	pH
1	67.27	32.73	98.57	1.43	6.06
2	65.04	34.96	98.52	1.48	5.90

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica del tercer tipo de residuo de café.

Lote	Humedad	ST (%)	SV	Cenizas	pH
1	62.28	37.72	98.61	1.39	6.05
2	61.62	38.38	97.99	2.01	7.05

Los resultados de la caracterización del residuo de los diferentes tipos de café, muestran valores altos de porcentaje en sólidos volátiles y muy bajos en cenizas, esto hace referencia a qué es un residuo orgánico con una cantidad mínima de residuos inorgánicos, este residuo se puede considerar limpio y prácticamente libre de impurezas. En cuanto al pH,

el valor promedio entre 5-7, llegando a estar en un valor casi neutro, esto debido al lavado que realiza la percoladora al tipo de café que fue llevado a ese tratamiento.

En el proceso de carbonización hidrotérmica se establecieron ciertos parámetros y condiciones de operación para obtener el biocarbón en condiciones estandarizadas. Para la relación 1:1 se pesaron 350 g de residuo y 350 mL de agua para llegar a un 70 % de la capacidad del reactor, esto por seguridad para evitar alguna fuga de líquido o gas, y se introdujeron dentro del reactor como se muestra en la Figura 1.

Las condiciones de operación del reactor para la carbonización de este residuo de percolado de café elegido fueron a las temperaturas de 175, 185 y 200 °C, y cada una de las temperaturas tuvieron tiempos de residencia de 1, 2 y 3 h. El tiempo de residencia se contó a partir de la llegada a la temperatura deseada. Posterior a la carbonización se espera un tiempo de 5 h para que el reactor pueda enfriarse en todas sus partes, para poder ser manipulado, donde primeramente se hace un conteo del gas generado, posteriormente se procede a abrir para retirar tanto el biocarbón en su fase húmeda como el bioaceite producido. El biocarbón en su fase húmeda es filtrado con papel filtro para retirar el exceso de bioaceite que afecte a su posterior secado, en esta fase húmeda se pesa y a continuación se deposita de manera equitativa en 2 charolas de aluminio para su secado en aproximadamente de 5 a 8 h como se muestra en la Figura 2.

Finalmente, el biocarbón se pesa en base seca y se almacena en bolsa herméticamente selladas para su almacenamiento en espera de poder ser llevadas a pruebas de poder calorífico. Como se muestra en la Figura 3.



Figura 1. Residuo y agua dentro del reactor de carbonización.



Figura 2. Biocarbón en fase húmeda para su secado.



Figura 3. Biocarbón almacenado.

La producción de biocarbón se resume en la Figura 4 que nos indica los diferentes rendimientos a la temperatura y tiempo de residencia indicado.

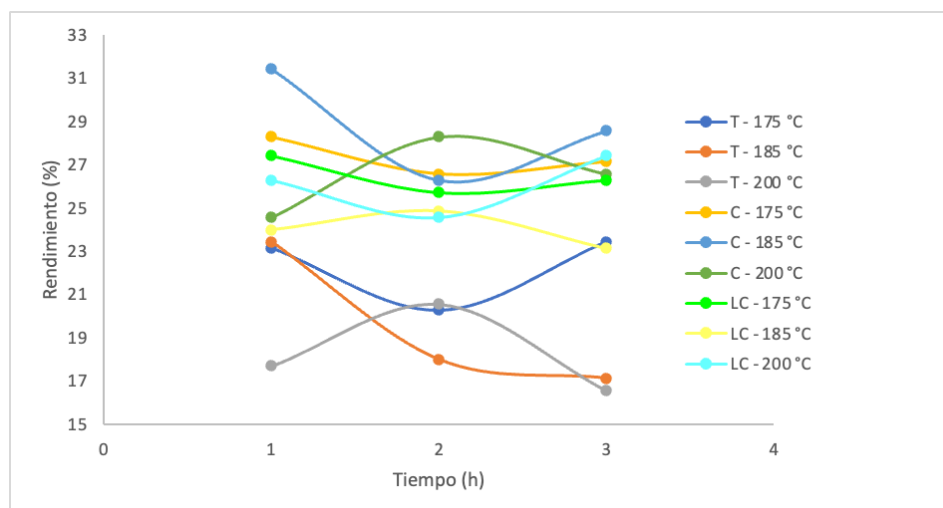


Figura 4. Comparativa de rendimiento de biocarbón de los diferentes tipos de café

Al concluir el proceso de carbonización se realiza la caracterización de todos los biocarbones producidos hasta el momento, obteniendo los siguientes resultados en las tablas 6, 7 y 8 respectivamente.

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica de los diferentes biocarbones del primer tipo de café (Toka Premium, especie *Coffea arabica*).

Condiciones		Humedad (%)	ST (% m/m)	SV (% m/m)	Cenizas (%)	pH
Temperatura (°C)	Tiempo (h)					
175	1	16.42	83.58	77.10	22.90	4.25
185	1	22.18	77.82	69.54	30.46	4.00
200	1	5.85	94.15	66.23	33.77	4.17
175	2	14.66	85.34	73.58	26.42	4.00
185	2	20.78	79.22	65.20	34.80	3.95
200	2	25.67	74.33	61.53	38.47	4.08
175	3	20.66	79.34	68.84	31.16	3.92
185	3	7.32	92.68	62.37	37.63	3.92
200	3	18.42	81.58	60.56	39.44	4.21

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de los diferentes biocarbones del segundo tipo de café (Cafiver House Blend Gourmet, especie *Coffea arabica*).

Condiciones		Humedad (%)	ST (% m/m)	SV (% m/m)	Cenizas (%)	pH
Temperatura (°C)	Tiempo (h)					
175	1	27.12	72.88	74.90	25.10	3.81
185	1	17.27	82.73	76.80	23.20	3.75
200	1	5.82	94.18	62.55	37.45	3.86
175	2	7.12	92.88	68.96	31.04	3.64
185	2	5.70	94.30	65.47	34.53	3.77
200	2	5.52	94.48	71.43	28.57	3.86
175	3	7.94	92.06	69.02	30.98	3.62
185	3	5.44	94.56	63.23	36.77	3.83
200	3	4.46	95.54	65.69	34.31	4.03

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica de los diferentes biocarbones del tercer tipo de café

Condiciones		Humedad (%)	ST (% m/m)	SV (% m/m)	Cenizas (%)	pH
Temperatura (°C)	Tiempo (h)					
175	1	5.81	94.19	77.56	22.44	3.79
185	1	5.01	94.99	76.63	23.37	3.59
200	1	13.62	86.38	67.40	32.60	3.63
175	2	4.75	95.25	71.83	28.17	3.71
185	2	4.32	95.68	67.32	32.68	3.69
200	2	4.44	95.56	63.14	36.86	3.66
175	3	4.35	95.65	70.54	29.46	3.67
185	3	5.93	94.07	64.27	35.73	3.90
200	3	12.64	87.36	69.49	30.51	3.83

## Conclusiones

La relación 1:1 biomasa-agua, resultado adecuada para realizar la carbonización hidrotérmica de los 3 tipos de *Coffea arabica*. El rendimiento está influenciado por la temperatura y el tiempo. Observándose que el mejor rendimiento se

obtuvo en un tiempo de retención 1h y 185 °C de temperatura, para la segunda especie; en estas condiciones la caracterización del biocarbón (hidrochar) mostro un pH ácido, con una humedad del 17.25 % y 23.20 % de cenizas.

**Agradecimientos y financiamiento:** Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba por permitir la realización de este trabajo de investigación dentro del laboratorio de ingeniería ambiental 1. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proporcionar la beca de estudios de maestría, sin este apoyo no sería posible realizar los estudios.

## Bibliografía

- Afolabi O. O., Sohail M. and Cheng Y.L. 2020. Optimization and characterization of hydrochar production from spent coffee grounds by hydrothermal carbonization. *Renewable Energy*. 147: 1380-1391. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.098>
- Fernández M.E., Ledesma B., Román S., Bonelli, P.R. and Cukierman A.L. 2015. Development and characterization of activated hydrochars from orange peels as potential adsorbents for emerging organic contaminants. *Bioresource Technology* 183: 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.035>
- Maniscalco M.P., Volpe M. and Messinco A. 2020. Hydrothermal Carbonization as a valuable tool for energy and environmental applications: A Review. *Energies*. 2020; 13(16):4098. <https://doi.org/10.3390/en13164098>
- Soluciones para el Desarrollo Sustentable. (2018). INNOVACARB: transforma el residuo de café en carbón activado vegetal. <https://sdsnmexico.mx/banco-de-proyectos/economia-circular-y-tecnologias-sostenibles/innovacarb/>.
- Zhang L., Wang Q., Wang B., Yang G., Lucia L.A. and Chen J. 2018. Hydrothermal Carbonization of Corn cob Residues for Hydrochar Production. *Energy & Fuels*. 29(2): 872-876. <https://doi.org/10.1021/ef502462p>