

Balance energético del biocarbón generado a partir de residuos de café gastado mediante el proceso de carbonización hidrotérmica

Daniel Orduña-Gaytán, Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Juan Manuel Méndez-Contreras, Alejandro Alvarado-Lassman *

Laboratorio de Ambiental I, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx; Tel: (+52) 272 139 9256

Energías Renovables (Desarrollo de procesos de generación de bioenergéticos). **Ponencia Presencial.**

Recibido: 16 de junio de 2023 Aceptado: 18 de septiembre de 2023 Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: El proceso de hidrocarbonización se ha destacado como una alternativa prometedora para el manejo y aprovechamiento de residuos, debido a sus beneficios operativos y menores costos de operación y mantenimiento en comparación con otros tratamientos. Sin embargo, el crecimiento de la urbanización y el desarrollo socioeconómico en los países en vías de desarrollo ha llevado a un aumento acelerado en la generación de residuos municipales, industriales y agrícolas. En particular, los residuos de café gastado (RCG), provenientes de establecimientos que sirven café, presentan un problema de contaminación debido a las grandes cantidades generadas y a la falta de una gestión y disposición adecuadas. En este estudio, se propone una alternativa para el aprovechamiento de los RCG a través del proceso de biotransformación en un Reactor Hidrotérmico de Alta Presión (RHAP). Se realizaron pruebas a diferentes temperaturas (175, 185 y 200 °C) y tiempos de residencia hidráulica (60, 120 y 180 min) a una presión de 1.8 - 2 mPa, utilizando lotes de 350 g de RCG. De acuerdo con los resultados obtenidos, se logró un rendimiento de producción de biocarbón de 110 g en el mejor de los casos (60 min y 185 °C) con relación al peso seco. Sin embargo, los mejores resultados en términos de contenido de carbono y valor de carbonización se obtuvieron con un tiempo de residencia de 60 min y una temperatura de 200 °C, con un 94.18 % y 62.25 % respectivamente. Estos resultados son importantes para evaluar el costo del procesamiento del biocarbón y los beneficios económicos asociados. Además, es necesario considerar los gastos energéticos del proceso y los balances de materia y energía para optimizar la eficiencia y minimizar los costos operativos. Estudios adicionales podrían explorar la viabilidad económica a gran escala de este proceso de biotransformación del RCG y su impacto en la gestión de residuos y la generación de bioenergéticos.

Palabras Clave: Hidrocarbonización; Biocarbón; Carbonización, Café.

Energy balance for the hydrothermal carbonization process of spent coffee grounds

Abstract: The hydrocarbonization process has emerged as a promising alternative for waste management and utilization due to its operational benefits and lower operating and maintenance costs compared to other treatments. However, the growth of urbanization and socio-economic development in developing countries has led to an accelerated increase in municipal, industrial, and agricultural waste generation. In particular, spent coffee grounds (SCG) from coffee-serving establishments pose a pollution problem due to the large quantities generated and the lack of proper management and disposal. In this study, an alternative for the utilization of SCG through the biotransformation process in a High-Pressure Hydrothermal Reactor (HPHR) is proposed. Experiments were conducted at different temperatures (175, 185, and 200 °C) and hydraulic residence times (60, 120, and 180 min) at a pressure of 1.8 - 2 mPa, using batches of 350 g of SCG. According to the results obtained, a biochar production yield of 110 g was achieved in the best-case scenario (60 min and 185 °C) relative to the dry weight. However, the best results in terms of carbon content and carbonization value were obtained with a residence time of 60 min and a temperature of 200 °C, at 94.18 % and 62.25 %, respectively. These results are crucial for evaluating the cost of biochar processing and the associated economic benefits. Furthermore, it is necessary to consider the energy expenses of the process and the material and energy balances to optimize efficiency and minimize operating costs. Additional studies could explore the economic viability of large-scale implementation of this SCG biotransformation process and its impact on waste management and bioenergy generation.

Introducción

En todo el mundo, la veloz urbanización y el progreso socioeconómico tanto en naciones en vías de desarrollo como en países desarrollados ha ocasionado un incremento vertiginoso en la generación de residuos municipales, industriales y agrícolas. Un esquema convencional de valor en una compañía abarca la obtención de materias primas, transporte, transformación, manufactura, embalaje de productos acabados, distribución y respaldo del producto, lo cual deriva en la producción de una amplia gama de desperdicios. No obstante, en la actualidad se han formulado y fomentado soluciones innovadoras que abarcan desde el tratamiento de residuos de alta tecnología hasta una mejor orientación y apoyo para la administración de desechos (Fiksel *et al.*, 2018; Hemati *et al.*, 2019).

El café (*Coffea arabica L.*) se encuentra involucrada en todas partes y es además la tercera bebida más consumida a nivel mundial, convirtiéndose así en uno de los cultivos más significativos globalmente. De acuerdo con la Organización Internacional del Café, se estima que la producción mundial de café ronda los 6 millones de toneladas anuales. El café tiene una gran importancia particular en América Latina; sin embargo, la disposición descontrolada de residuos causa problemas medioambientales. No obstante, si se gestiona de manera adecuada, los residuos del café pueden ser procesados y utilizados como fuente de energía (Canet-Brenes *et al.*, 2016; Pérez-Sánchez *et al.*, 2022; Lahcsen *et al.*, 2023]. Por otro lado, durante la cosecha de café 2020-2021, se estima que se generaron 11.4 millones de toneladas de subproductos sólidos y una mayor cantidad de aguas residuales. Sin embargo, hasta el momento no se han encontrado usos verdaderamente agregados para estos residuos potencialmente peligrosos, a pesar de los posibles beneficios económicos y medioambientales (Da-Silva *et al.*, 2022). En México, debido a la geografía nacional, es posible cultivar y producir distintas variedades de café, clasificadas entre las mejores del mundo, en 15 de los 32 estados que conforman la república, en una superficie de cultivo de 737 376 hectáreas (SIAP., 2017). El RCG, también conocido como borra de café, se genera principalmente en los establecimientos de cafeterías, los cuales no cuentan con un manejo o disposición adecuados para estos residuos, a pesar de que, debido al crecimiento y la alta demanda de los consumidores, la industria cafetera se ha convertido en un generador de grandes cantidades de residuos de café, siendo los más significativos los restos de café o el café gastado y la pulpa de café (Ortiz-Martínez., 2020). El proceso de hidrocarbonización se ha convertido en una alternativa prometedora para el manejo de residuos, ya que el producto resultante puede utilizarse como mejorador de suelos o como bioenergético (Afolabi *et al.*, 2020). La ventaja de este proceso radica en que los residuos se someten a condiciones económicamente viables, a diferencia de otros métodos o procesos que pueden conllevar altos costos de operación y mantenimiento.

Por lo tanto, esta investigación explora el uso de la carbonización hidrotermal para aprovechar los residuos de café usados de la especie *Coffea Arabica L.* Se emplea un reactor que, a diferencia de otros procesos, evita tiempos prolongados de operación y grandes cantidades de energía, generando un producto que puede utilizarse como bioenergético. Se analizan las variables de temperatura y tiempo de operación y cómo influyen en la composición final del producto obtenido.

Materiales y Métodos

Los RCG se obtuvieron de diversas cafeterías locales del municipio de Orizaba, Veracruz, México; las cuales, comercializan café en grano, molido y bebidas preparadas a partir de producto cosechado y procesado en los estados de Veracruz, Chiapas y Oaxaca. A partir de tres distintos tipos RCG (Café Toka Premium o Tipo “A”, Café Cafiver House Blend Tipo “B”, Café Lunas de Café Artesanal o Tipo “C”) que se generan mediante la percolación, los cuales son colectados y almacenados a 4 °C en un periodo no mayor a 5 días. Posteriormente, se realiza una separación manual para descartar algún agente externo inorgánico (como lo son plásticos, metales, partículas de otro residuo que no sea café, etc.) que pudiese contribuir a un mal desarrollo del proceso, de bioconversión. Además, de realizar un pretratamiento físico de reducción de partícula, maximizando la superficie de contacto para permitir la carbonización correcta del producto.

El proceso de hidrocarbonización se realizó en un RHAP, con capacidad máxima de 1 kg, a 70 % de capacidad. Por lo tanto, se operó en modo batch con lotes subsecuentes de 350 g de residuo de café más 350 mL de agua. Una vez cargado el lote, se sella, y se arranca el reactor definiendo las condiciones de operación mediante el controlador de acuerdo con la Tabla 1. Al finalizar, se extrae el biogás generado y el bioaceite y se extrae el biocarbón producido. Este último, se pesa siendo este el resultado de peso húmedo en gramos (gPH). Posteriormente el hidrocarbón se seca en una estufa de marca RIOSSA, durante 2 horas a una temperatura de 110 °C para obtener el peso seco en gramos (gPS).

Tabla 1. Condiciones de operación del RHAP

Parámetro	Relación 1:1 350 g RCG + 350 mL Agua Fresca								
	175			185			200		
Temperatura (°C)	175			185			200		
Tiempo (min)	60	120	180	60	120	180	60	120	180

A cada lote de producto obtenido, se realizó la caracterización fisicoquímica conforme a la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de productos de la bioconversión de RCG

Determinación	Unidad	Método
Sólidos Totales (ST)	g	Método gravimétrico 2540 G Standard Methods
Sólidos Totales Volátiles (STV)	g	
Cenizas	%	NMX-AA-16-1984
Humedad	%	
pH	-	

Resultados y Discusión

Producción de Biogás

La obtención de biogás generado en los tres distintos tipos de café se observa en la Figura 1, en la cual se presentan cada uno de los volúmenes obtenidos y que corresponden a cada una de las corridas experimentales que se realizaron de acuerdo con el tiempo y temperatura. Teniendo un máximo de 7800 mL de biogás generado (200 °C y 180 min) en el café tipo “B”, sin embargo, otras configuraciones muestran valores similares, el valor mas cercano es de 7450 mL (200°C y 120 min) el cual equivale a una hora menos para el proceso, por lo que se sugeriría que, para la obtención de grandes cantidades de biogás, se trabaje a altas temperaturas y en tiempos muy prolongados.

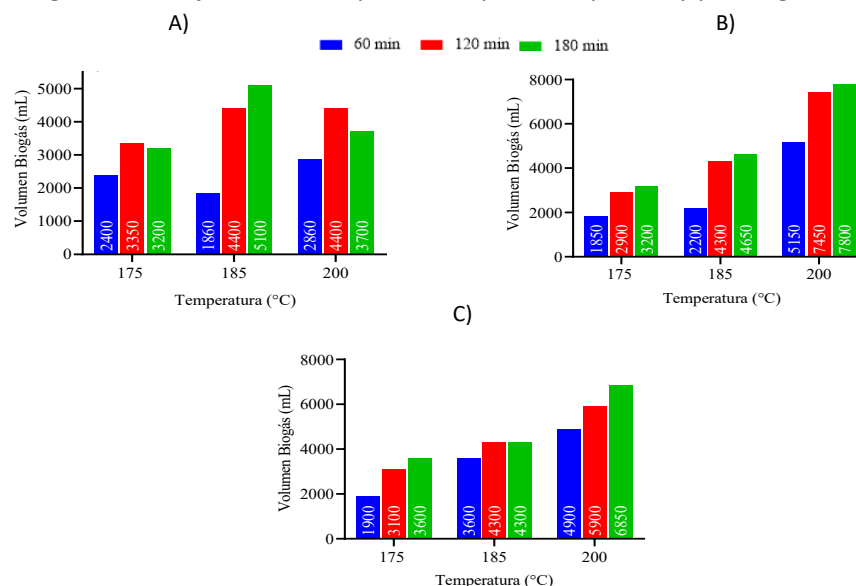


Figura 1. Gráfica de producción de biogás (Tipo A, B y C).

Análisis del carbón hidrotérmico

Se realizó la caracterización fisicoquímica del carbón sintetizado, conforme a lo establecido en el apartado anterior, con lo que se construyeron las distintas tablas descritas a continuación.

Tabla 3. Análisis fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Toka Premium).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
pH	4.25	4	4.17	4	3.95	4.08	3.92	3.92	4.21
% Humedad	16.42	22.18	5.85	14.66	20.78	25.67	20.66	7.32	18.42
% Cenizas	22.90	30.46	33.77	26.42	34.80	38.47	31.16	37.63	39.44

En este caso se puede observar en la Tabla 3 una tendencia acida en el biocarbón generado con un promedio de 4.05 pH.

Tabla 4. Análisis fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Cafiver House Blend).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
pH	3.81	3.75	3.86	3.75	3.77	3.86	3.62	3.83	4.03
% Humedad	27.12	17.27	5.82	7.12	5.70	5.52	7.94	5.44	4.46
% Cenizas	25.10	23.20	37.45	31.04	34.53	28.57	30.98	36.77	34.31

En la Tabla 4 cuenta con un promedio de 3.80 de pH que comparado con los resultados anteriores en el tipo A, aumento la acidez.

Tabla 5. Análisis fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Lunas de Café Artesanal).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
pH	3.79	3.59	3.63	3.71	3.69	3.66	3.67	3.90	3.83
% Humedad	5.81	5.01	13.62	4.75	4.32	4.44	4.35	5.93	12.64
% Cenizas	22.44	23.37	32.60	28.17	32.68	36.86	29.46	35.73	30.51

En la Tabla 5 el promedio de pH es de 3.72, que se asemeja al resultado del tipo B, siendo muy semejantes los resultados obtenidos.

Monitoreo de bioconversión

Los resultados de la bioconversión se ven reflejados en las Figuras 2, 3 y 4; donde los mejores resultados del café Tipo A de peso húmedo es de 286 g (185 °C y 180 min) mientras que de peso seco es de 82 g (185 °C y 60 min); Tipo B de peso húmedo es de 361 g (175 °C y 60 min) y de peso seco es de 110 g que comparten la misma configuración; del Tipo C para peso húmedo es de 322 g (175 °C y 180 min) y de peso seco es de 96 g, donde se sugiere utilizar la configuración con menor tiempo de residencia hidráulica (175 °C y 60 min).

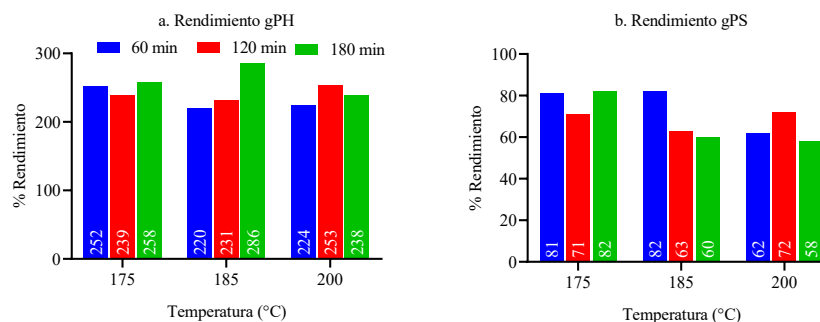


Figura 2. Comparativa de rendimiento de biocarbón Tipo A.

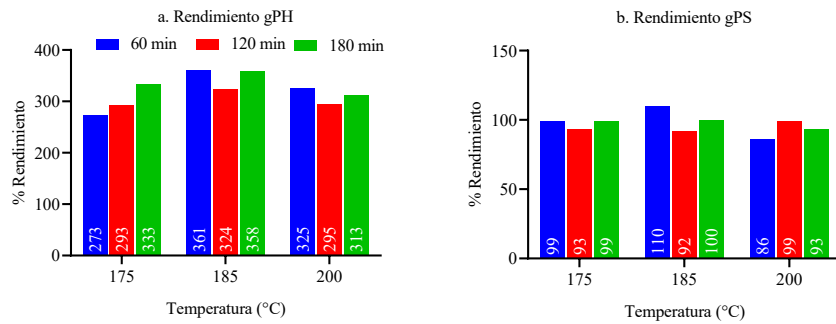


Figura 3. Comparativa de rendimiento de biocarbón Tipo B.

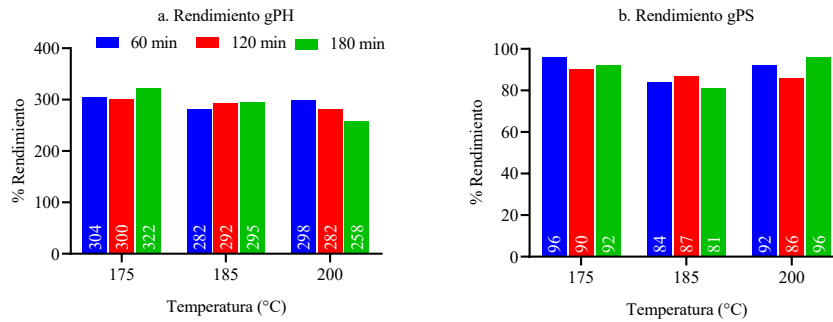


Figura 4. Comparativa de rendimiento de biocarbón Tipo C.

Monitoreo de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles

De acuerdo con fuentes de información, un biocarbón debe tener como características para tener un buen rendimiento energético, debe de contener mayor cantidad orgánica que inorgánica, ya que este último afecta negativamente la propiedad física que se desea, por lo que, se desea una cantidad alta de ST y una cantidad mínima (primordialmente) de STV, ya que este último representa la cantidad inorgánica presente en el biocarbón. En la Figura 5, 6 y 7; el mejor resultado de porcentaje del Tipo A es de 94.15 % de ST y 66.23 % STV (200 °C y 60 min), para el Tipo B es de 94.18 % ST y 62.25 % STV (200 °C y 60 min), para el Tipo C es de 95.56 % ST y 63.14 % STV (200 °C y 120 min).

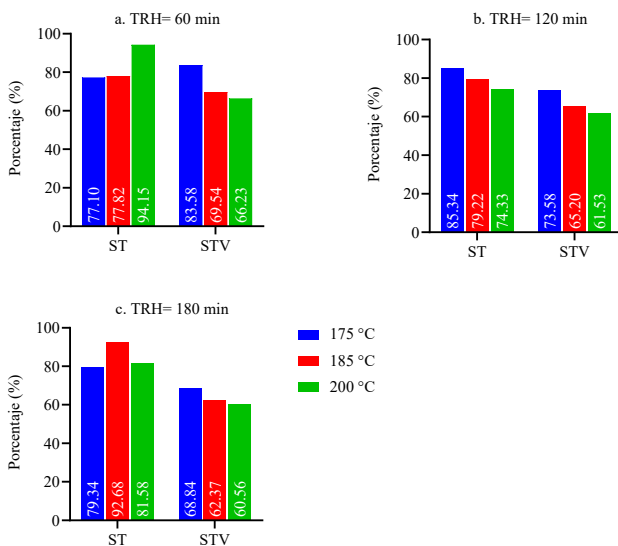


Figura 5. Monitoreo de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles Tipo A.

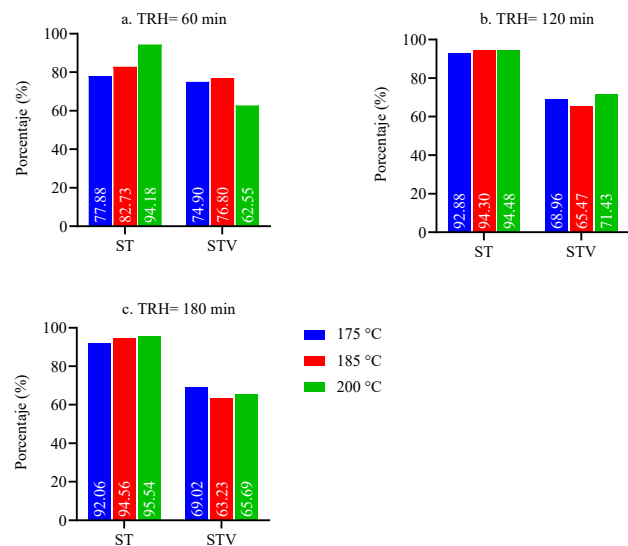


Figura 6. Monitoreo de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles Tipo B.

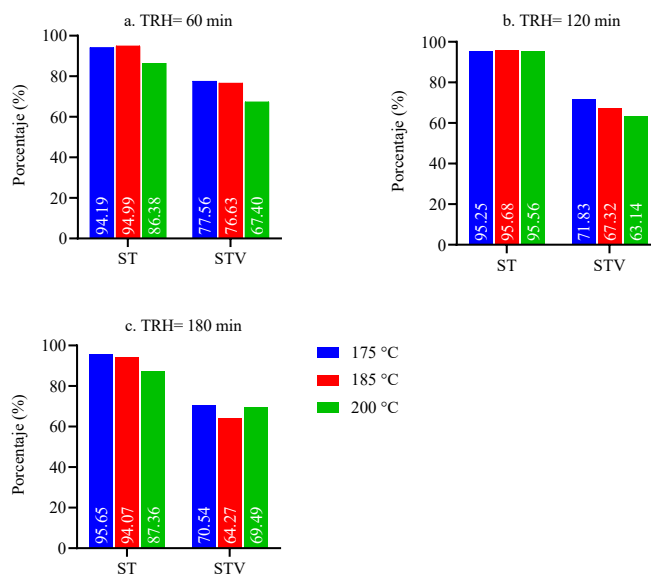


Figura 7. Monitoreo de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles Tipo C.

Flujo Energético del proceso de la carbonización hidrotérmica

Se llevó a cabo el análisis energético de los experimentos realizados en el laboratorio y se presentan en la Tabla 6, con el objetivo de determinar la cantidad de energía necesaria para el proceso de hidrocarbonización, desde el tiempo de preparación hasta el tiempo de residencia de cada uno de los procesos.

Tabla 6. Flujo energético total del proceso de la hidrocarbonización.

Marca de Café	Temperatura (C°)	Tiempo de Residencia (h)	Tiempo de acondicionamiento (h)	Tiempo Total (h)	Energía Consumida (KWh)
A	175	1	4.17	5.17	1.645
A	175	2	4.17	6.17	1.978
A	175	3	4.17	7.17	2.232
A	185	1	4.75	5.75	1.809
A	185	2	4.85	6.85	2.116
A	185	3	4.75	7.75	2.311
A	200	1	6	7	2.400
A	200	2	6	8	2.566
A	200	3	6	9	3.041
B	175	1	4.07	5.07	1.510
B	175	2	4.17	6.17	1.978
B	175	3	4.25	7.25	2.245
B	185	1	5.12	6.12	1.957
B	185	2	4.88	6.88	2.172
B	185	3	5.08	8.08	2.648
B	200	1	6	7	2.400
B	200	2	6.17	8.17	2.741
B	200	3	6.05	9.05	3.060
C	175	1	4.50	5.5	1.738
C	175	2	4.55	6.55	2.056
C	175	3	4.58	7.58	2.890
C	185	1	5.25	6.25	1.996
C	185	2	5.33	7.33	2.255
C	185	3	5.47	8.47	2.849
C	200	1	6.17	7.17	2.235
C	200	2	6.50	8.5	2.86
C	200	3	6.50	9.5	3.319

Balance Energético a partir de la relación de Energía-Consumo

Por último, de acuerdo con los resultados presentados anteriormente, y teniendo en cuenta la energía utilizada para realizar el proceso, se presenta la relación de energía generada con respecto a la energía consumida, en la Tabla 7 se muestra los resultados de las pruebas de poder calorífico más significativas, teniendo un valor máximo de 40.52 MJ/kg (200 °C y 60 min), cabe destacar que el promedio del poder calorífico es de 25.80 MJ/kg, por lo que no se aleja del valor del poder calorífico del carbón mineral que es de 31.50 MJ/kg.

Tabla 7. Balance energético a partir de la relación de Energía Generada - Energía Consumida.

Marca de Café	Temperatura (°C)	TRH (h)	Energía Consumida (MJ)	Poder calorífico (MJ/kg)	Energía aportada por el hidrocarbón (MJ)	Relación de energía (hidrocarbón/consumo)
A	175	1	3.600	23.74	1.92294	0.534
A	185	1	3.600	37.45	2.65895	0.739
A	200	1	3.600	31.15	2.492	0.692
B	175	1	3.600	19.01	1.88199	0.523
B	185	1	3.600	17.9	1.6647	0.462
B	200	1	3.600	22.83	2.16885	0.602
C	175	1	3.600	18.66	1.79136	0.498
C	185	1	3.600	26.09	2.3481	0.652
C	200	1	3.600	40.52	3.72784	1.036

Conclusiones

Es posible aprovechar los RCG con la implementación de nuevas tecnologías, como el proceso de carbonización hidrotermal utilizando un reactor de alta presión. Este método ofrece rendimientos significativos de bioconversión (recomendando el uso de RCG dentro del RHAP de 200 °C y 60 min) en comparación con enfoques convencionales como la pirolisis, que conlleva altos costos de operación y mantenimiento. Además de producir un producto final, este proceso también genera dos subproductos valiosos: biogás y bioaceite, lo que abre nuevas oportunidades de investigación. Esta alternativa puede ser una solución viable, especialmente en países en desarrollo, debido a la creciente demanda de productos agroalimentarios y la consiguiente generación excesiva de residuos sólidos sin tratamiento adecuado. El procesamiento de los RCG puede proporcionar beneficios económicos, como la mejora de los suelos y la obtención de un poder calorífico una vez procesados. Es importante tener en cuenta que el poder calorífico generado por el biocarbón es significativamente mayor, pero se requiere trabajar con volúmenes de RCG a mayor escala para aprovecharlo adecuadamente.

Agradecimientos y financiamiento: Además, quiero expresar mi profundo agradecimiento al CONACYT por la beca otorgada para realizar estudios de maestría.

Bibliografía

- Afolabi, O. O., Sohail, M., & Cheng, Y. L. (2020). Optimisation and characterisation of hydrochar production from spent coffee grounds by hydrothermal carbonisation. *Renewable Energy*, 147, 1380-1391. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.098>
- Canet-Brenes, G., Soto Viquez, C., Ocampo Thomason, P., Rivera Ramírez, J., Navarro Hurtado, A., Guatemala Morales, G., y Villanueva Rodríguez, S. (2016). La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y El Caribe. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/2792>
- Da Silva, M. R., Bragagnolo, F. S., Carneiro, R. L., Pereira, I. D. O. C., Ribeiro, J. A. A., Rodrigues, C. M., ... and Funari, C. S. (2022). Metabolite characterization of fifteen by-products of the coffee production chain: From farm to factory. *Food Chemistry*, 369, 130753. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130753>
- Fiksel, J., and Lal, R. (2018). Transforming waste into resources for the Indian economy. *Environmental Development*, 26, 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.02.002>

-
- Hemati, S., Udayakumar, S., Wesley, C., Biswal, S., Sarmadi, N., Pahlevani, F., and Sahajwalla, V. (2023). Thermal Transformation of Secondary Resources of Carbon-Rich Wastes into Valuable Industrial Applications. *Journal of Composites Science*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/jcs7010008>
- Lahcen, S. A. L., Ahmed, S. I., Lahboubi, N., and El Bari, H. (2023). Energetic potential of coffee waste from anaerobic digestion and combustion. *Ecol. Eng*, 2, 138-145. <https://doi.org/10.12912/27197050/156970>
- Ortiz-Martínez, S. A. (2020). Evaluación de una propuesta para la obtención de cafeína partiendo de residuos de café generados por la industria cafetera (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América). <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7785>
- Pérez-Sánchez, O., Pérez-Vázquez, A., Lango-Reynoso, V., Gallardo-López, F., and Escamilla-Prado, E. (2022). Bibliographic analysis of sustainability studies in coffee agroecosystem from 2010 to 2019. *Agroproductividad*, 15(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i3.2129>
- SIAP, Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (2014). Cierre de la producción agrícola por estado. Recuperado el 23 de mayo de 2022, <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agrico-la-por-estado/>