

Aplicación del proceso de carbonización hidrotérmica empleando cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible

Víctor Eduardo Ojeda-Rodríguez ¹, Joahnn H. Palacios ², Juan Manuel Méndez-Contreras ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹, Erik Samuel Rosas-Mendoza ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

² Research and Development Institute for the Agri-Environment. 2700 Einstein Street, Quebec City, Quebec, Canada

* Autor de correspondencia: erik.rm@orizaba.tecnm.mx

Energías Renovables (Biocombustibles)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 14 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.614>

Resumen: El aumento de la población mundial continua en ascenso y esto ocasiona un incremento en la demanda de los recursos existentes para cubrir sus necesidades, por ejemplo, la demanda de alimentos y de energía. Bajo este contexto, el arroz es un producto de alto consumo a nivel mundial y éste genera un residuo de tipo agroindustrial, llamado cascarilla de arroz, que actualmente carece de valor económico y de una adecuada gestión. El desafío global consiste en darle valor agregado a los residuos agroindustriales y encontrar nuevas formas de energía amigables con el medio ambiente. Por ello, el objetivo de esta investigación fue llevar a cabo la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible. La carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz se realizó en un reactor de acero inoxidable, modelo CF-1 con capacidad de 1 L, bajo una temperatura de 200 °C durante tres tiempos de reacción que fueron 1, 2 y 3 h. La cascarilla de arroz y los hidrochares fueron analizados mediante pH, humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas, conductividad eléctrica, análisis elemental y poder calorífico superior (PCS). Como parte de los resultados, se obtuvieron valores de sólidos volátiles 74.82, 74.44 y 74.74 %, cenizas 25.18, 25.56 y 25.26 %, y carbono 39.41, 40.67 y 41.00 %; para los hidrochares carbonizados a 1, 2 y 3 h, respectivamente. Así mismo, los valores del PCS de los hidrochares se mantuvo en un rango de 15.71 a 16.36 MJ/kg. La conversión termoquímica de la cascarilla de arroz contribuye a reducir el volumen de un residuo agroindustrial de difícil manejo y a su vez, proporciona un biocombustible con un PCS mayor que el de la biomasa inicial (14.34 MJ/kg). Al final del estudio, se observó que con un tiempo de una hora sería suficiente para mejorar el PCS con relación a la cascarilla de arroz sin carbonizar.

Palabras clave: cascarilla de arroz, carbonización hidrotérmica, hidrochar, poder calorífico superior, biocombustible

Application of the hydrothermal carbonization process using rice husk for the production of hydrochar as a biofuel

Abstract: The continuous growth of the global population has led to an increasing demand for existing resources to meet basic needs, such as food and energy. In this context, rice is a widely consumed product worldwide and generates an agro-industrial residue known as rice husk, which currently has low economic value and lacks proper management. The global challenge lies in adding value to agro-industrial residues and identifying new environmentally friendly energy sources. Therefore, the objective of this study was to carry out the hydrothermal carbonization of rice husk for the production of hydrochar as a biofuel. Hydrothermal carbonization of rice husk was performed in a stainless-steel reactor (model CF-1) with a capacity of 1 L, at a temperature of 200 °C and reaction times of 1, 2, and 3 h. Rice husk and the resulting hydrochars were analyzed for pH, moisture content, total solids, volatile solids, ash content, electrical conductivity, elemental composition, and higher heating value (HHV). The results showed volatile solids contents of 74.82, 74.44, and 74.74%, ash contents of 25.18, 25.56, and 25.26%, and carbon contents of 39.41, 40.67, and 41.00% for hydrochars produced at 1, 2, and 3 h, respectively. Likewise, the HHV of the hydrochars ranged from 15.71 to 16.36 MJ/kg. The thermochemical conversion of rice husk contributes to reducing the volume of an agro-industrial residue that is difficult to manage while simultaneously providing a biofuel with a higher HHV than that of the raw biomass (14.34 MJ/kg). At the end of the study, it was observed that a reaction time of 1 h was sufficient to improve the HHV compared to untreated rice husk.

Keywords: rice husk, hydrothermal carbonization, hydrochar, higher heating value, biofuel

Introducción

De acuerdo con información reciente, se estima que la población mundial aumentará de 8.5 mil millones en 2030 a 9.7 mil millones en 2050, este hecho es paralelo al crecimiento de la urbanización e industrialización que dependen en gran medida de los combustibles fósiles (ONU, 2017; Meninno, 2023). Así mismo, la industrialización implica el consumo de hidrocarburos y, por lo tanto, el aumento en la liberación de contaminantes hacia la atmósfera y ecosistemas terrestres y marinos (Chen *et al.*, 2024). Por ello, existe una urgencia de abordar el cambio climático y problemas ambientales

(Ischia *et al.*, 2024), así como la necesidad de satisfacer las necesidades alimenticias. Por otro lado, la proyección de la demanda de productos agrícolas global, debido al aumento poblacional, para el año 2050 será de un 60 % (Hamidu *et al.*, 2025).

Dentro de los productos agrícolas de mayor consumo se encuentra el arroz, que es un cereal considerado como un alimento básico para aproximadamente la mitad del mundo (Nzereogu *et al.*, 2023). Por ejemplo, en México durante el periodo 2022–2023, la producción de arroz fue aproximadamente 157 mil toneladas (SIAP, 2023a). Derivado del consumo de arroz se obtienen dos tipos de residuos principales que son la paja y la cascarilla de arroz (CA). La CA es la capa exterior del grano de arroz (Bushra y Remya, 2020) y representa el 20 % del peso total del grano (Naranjo *et al.*, 2023), cuenta con una baja densidad aparente, la cual va de 96 a 140 kg/m³ (Nzereogu *et al.*, 2023). La CA es un tipo de biomasa lignocelulósica que consiste principalmente en: celulosa (35 %), hemicelulosa (30 %) y lignina (18 %) (Nizamuddin *et al.*, 2018). Como parte de sus propiedades destacan: contenido de humedad (4.5–10.8 %), materia volátil (70.2–78.5 %), contenido de cenizas (3.4–17 %) y de carbono fijo (3.4–19.8 %) (Bushra y Remya, 2020). Sin embargo, la CA también presenta alto contenido de sílice (18–25 %) del peso total (Kordi *et al.*, 2023), lo cual hace que este residuo sea de difícil manejo y aprovechamiento como típicamente son aprovechados otros residuos agrícolas.

Dentro de las alternativas de aprovechamiento de la CA, puede emplearse la carbonización hidrotérmica (CHT), que es un proceso termoquímico llevado a cabo en presencia de agua comprimida en un rango de 180 a 250 °C (Higgins *et al.*, 2020) y bajo presiones autógenas de alrededor de 4 MPa (Ighalo *et al.*, 2025). La CHT se considera un proceso sostenible debido al ahorro energético operativo y eliminación de etapas de pretratamiento de las muestras (Pauline y Joseph, 2020; Orzama-Hugo *et al.*, 2024; Selvaraj *et al.*, 2025). Los productos principales resultantes de la CHT son: 1) Una fase sólida rica en carbono conocida como hidrochar, 2) Una fase líquida abundante en compuestos orgánicos referida como agua de proceso (Ischia *et al.*, 2024) y 3) Gas de síntesis, conformado principalmente por CO₂ y CO (Higgins *et al.*, 2020).

Recientemente, se han realizado diversas aplicaciones de la CHT utilizando CA bajo distintas condiciones de operación, entre ellas destacan: 1) Nizamuddin *et al.* (2018), efectuaron el proceso CHT con microondas, a 220 °C durante 30 min. El rendimiento de hidrochar fue 35.9 % con un PCS de 16.10 MJ/kg, utilizado como adsorbente, secuestrador de carbono y remediador de suelos para la agricultura. 2) Danso-Boateng *et al.* (2020), evaluaron la capacidad de adsorción del hidrochar obtenido a 200 °C por 20 h, observando que después del proceso existe un aumento de C y disminución de O, pasando de un 53.7 a un 74.1 % de C. 3) Hossain *et al.* (2020), evaluaron las propiedades del hidrochar como combustible y adsorbente, obteniendo hidrochar a 180 °C durante 20 min de reacción con un PCS entre 20.27 y 19.02 MJ/kg. 4) Yang *et al.* (2021), efectuaron una co-CHT con CA y un carbón de la región de Zhundong a 200 °C durante 2 h y el hidrochar tuvo una composición del 98.9 % de SiO₂ en las cenizas. 5) Li *et al.* (2021), adicionaron cloruros metálicos al agua de alimentación de la CHT para evaluar la mejoría de la carbonización y ésta adición afectó directamente los rendimientos de hidrochar del 28.97 % al 47.10 %.

De acuerdo con las condiciones de operación y aplicaciones analizadas anteriormente, se identificó la necesidad de hacer una evaluación de la CHT de CA con una temperatura de trabajo intermedia y tiempos moderados. En este sentido, la novedad de este trabajo consiste en emplear la CHT a 200 °C durante 1, 2 y 3 horas, buscando tener un proceso rentable para la obtención de hidrochar como biocombustible. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es llevar a cabo la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible.

Materiales y Métodos

A continuación, se describen los métodos empleados para la caracterización de la cascarilla de arroz y el hidrochar. De igual manera, se explica el proceso de CHT para la producción de hidrochar, así como la determinación del poder calorífico superior (PCS):

Recolección y caracterización de la cascarilla de arroz

Como materia prima se utilizó la cascarilla de arroz proporcionada por una planta procesadora de alimentos de la ciudad de Orizaba, Veracruz, México, la cual aproximadamente genera 10,000 t/mes de CA. La CA fue transportada y almacenada en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental I del Instituto Tecnológico de Orizaba para su análisis. Como parte del estudio, se realizó una caracterización fisicoquímica por triplicado mediante: pH por la determinación TAPPI

T252 om-90, contenido de humedad y sólidos totales por el método gravimétrico 2540 B, contenido de sólidos volátiles y cenizas mediante método gravimétrico 2540 E. Adicionalmente, se determinó la conductividad eléctrica (CE) mediante un conductímetro (HANNA® Instruments, HI98130, USA). Así mismo, se llevó a cabo un análisis elemental, en un analizador (Perkin Elmer, PE2400, USA) para la determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre. El contenido de oxígeno se determinó por diferencia utilizando CHNS y cenizas.

Carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz

Debido a que la cascarilla de arroz presentó un bajo contenido de humedad, ésta se sometió a molienda y se hidrató bajo la relación másica 1:3, cascarilla de arroz:agua. Después de la hidratación, la humedad de la CA fue del 75.58 ± 2.40 %. Con este valor, se obtuvo el porcentaje mínimo de humedad (70 %) de operación del proceso de CHT (Pagés-Díaz y Huiliñir, 2020). La CHT se llevó a cabo en un reactor de acero inoxidable de alta presión (Toption Instruments, CF-1, China), con capacidad de 1 L, como se muestra en la Figura 1. Se efectuaron tres carbonizaciones manteniendo la temperatura de 200 °C, pero con diferentes tiempos de reacción (1, 2 y 3 horas). La CHT fue evaluada a 200 °C debido a que es una temperatura intermedia dentro del rango de operación del proceso.



Figura 1. Reactor de carbonización hidrotérmica

Caracterización del hidrochar y determinación del poder calorífico superior (PCS)

A partir del análisis elemental y el contenido de cenizas, se determinó el PCS teórico por medio de la Ecuación 1, empleada por Parikh y Chinniwala (2002):

$$PCS (MJ/kg) = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.015 * N - 0.0211 * \text{Cenizas} \quad (1)$$

Donde: C = Carbono (%), H = Hidrógeno (%), S = Azufre (%), O = Oxígeno (%), N = Nitrógeno (%) y Cenizas = (%). Todos los porcentajes expresados en peso.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la cascarilla de arroz y de los hidrochares obtenidos a partir de la CHT:

Caracterización de la cascarilla de arroz

Los resultados de la caracterización fisicoquímica, CE, análisis elemental y PCS de la CA se muestran en la Tabla 1. De igual forma, se presenta una comparación de los resultados obtenidos con otras investigaciones reportadas en literatura.

A partir de la medición del pH se observa que la CA presentó un valor cercano a la neutralidad, similar al reportado por Nwajiaku *et al.* (2018), que son los valores típicos del pH de la CA. Ahora bien, haciendo una comparación en el contenido de humedad de la muestra, se obtuvo un valor superior a lo reportado por los demás autores. Sin embargo, aunque el porcentaje de humedad de la CA analizada en esta investigación fue de 10.30 ± 0.09 %, se observó que es insuficiente para que la biomasa pueda ser sometida al proceso de CHT, debido a que el proceso requiere por lo menos el 70 % de humedad de acuerdo con Pagés-Díaz y Huiliñir (2020). Por ello, se requiere de una hidratación para satisfacer esta condición inicial de la CA. Por otro lado, de acuerdo con el 78.71 ± 0.19 % de SV, indicó la disponibilidad de la materia orgánica presente en la muestra para que se puede realizar la carbonización. Cabe mencionar que, debido a la temperatura intermedia de operación (200 °C), solamente se carbonizaron las cadenas orgánicas de bajo peso molecular, como son los azúcares y las grasas presentes en la CA; pero en cuanto a la celulosa, hemicelulosa y lignina no se carbonizaron debido a que requieren de temperaturas superiores a los 220 °C (Jia *et al.*, 2022). En cuanto al contenido de cenizas, la CA mostró una composición del 21.29 ± 0.19 %, este valor es superior al reportado por Nwajiaku *et al.* (2018) y Steven *et al.* (2021), tal como se muestra en la Tabla 1. Es importante mencionar que, de acuerdo con Steven *et al.* (2021), entre el 83.6 y 93.5 % del contenido de cenizas corresponde al sílice presente en la CA. La presencia de sílice en la CA hace que este tipo de residuo sea de difícil manejo, las limitantes por su alta concentración de sílice son: 1) Los animales no pueden digerirla y 2) La alta resistencia a ser quemada (Ojeda-Rodríguez *et al.*, 2024). Por otro lado, la conductividad eléctrica fue de 373.67 ± 8.08 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un valor cercano al reportado por Nwajiaku *et al.* en 2018. En cuanto al análisis elemental, el contenido de C fue del 36.70 ± 0.42 %, el cual contrasta con el valor reportado por Hossain *et al.* (2020), siendo 25.9 %. También, se puede observar en la Tabla 1 que los porcentajes de H, N y S son similares a los encontrados por Hossain *et al.* (2020). Sin embargo, Steven *et al.* (2021), mencionan un contenido de C similar con valor de 36.60 %, pero porcentajes superiores de H y N. La presencia de CHON en la CA, especialmente la del C es altamente favorable para el hidrochar, ya que se trata de un residuo sólido rico en C.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de la CA y comparada con otros autores

Referencia	Parámetro											
	pH	Hum. (%)	ST (%)	SV (%)	Cen. (%)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	PCS (MJ/kg)
Resultados de esta investigación	6.79 ± 0.01	10.30 ± 0.09	89.70 ± 0.09	78.71 ± 0.19	21.29 ± 0.19	373.67 ± 8.08	36.70 ± 0.42	4.94 ± 0.04	0.32 ± 0.27	0.04 ± 0.04	37.36	14.34
Nwajiaku <i>et al.</i> (2018)	6.5	-	-	-	11.5	330	-	-	-	-	-	-
Hossain <i>et al.</i> (2020)	-	7.5	-	-	-	-	25.9	4.7	0.6	0.3	-	14.53
Steven <i>et al.</i> (2021)	-	9.3	-	-	17.6	-	36.60	5.83	3.31	-	36.65	14.01

Hum. = Humedad, Cen. = Cenizas

La razón por la cual las propiedades de la CA evaluada en esta investigación son diferentes a las reportadas en literatura, pueden atribuirse a que el arroz procesado en este caso de estudio, y por lo tanto sus desechos, esta constituido por el arroz nacional más el arroz importado de países como India, Tailandia, Vietnam y Pakistán (SIAP, 2023b); los cuales son cultivados bajo diferentes condiciones ambientales, entre ellas destacan: tipo de suelo, clima de cada región de cultivo y temporada de siembra y de cosecha.

Productos obtenidos de la CHT

Durante cada carbonización se utilizaron 150 g de CA y 450 g de agua, para tener una masa total de 600 g. Ahora bien, el hidrochar es el producto principal de la CHT, para este caso el rendimiento del hidrochar mostró un ligero comportamiento ascendente del 72 al 76.67 %. El rendimiento de hidrochar puede ser variable debido a que usualmente la CA procedente de las plantas procesadoras de alimentos no presenta un tamaño homogéneo. Además del tamaño de la cascarilla de arroz, el rendimiento del hidrochar depende de las características de la biomasa inicial y relación de agua:biomasa. Sin embargo, la temperatura y tiempo de reacción tienen influencia sobre el proceso de CHT, por ejemplo, emplear temperaturas y tiempos de reacción bajos, conducen a un alto rendimiento del hidrochar (Masoumi *et al.*, 2021; Romano *et al.*, 2023). El agua obtenida del proceso de CHT cuenta con propiedades para ser empleada y valorizada por otro tipo de procesos como: sustrato en digestión anaerobia, fertilizante líquido, material de co-carbonización hidrotérmica, entre otros, sin embargo; para efectos de esta investigación el agua de proceso no

fue analizada. Por otro lado, el gas de síntesis representa una fracción másica despreciable. En la Tabla 2 se observan los resultados de los productos obtenidos a partir de la CHT.

Tabla 2. Productos obtenidos del proceso de CHT a 200 °C

Tiempo de reacción (h)	Gas de síntesis (mL)	Agua de proceso (g)	Hidrochar (g)	Rendimiento de hidrochar (%)
1	2,590	461	108	72.00
2	2,920	474	114	76.00
3	2,690	425	115	76.67

Caracterización del hidrochar

En la Tabla 3, se observan los resultados de la caracterización realizada a los hidrochares obtenidos a 200 °C y 1, 2 y 3 horas, respectivamente. El pH del hidrochar mostró un comportamiento ligeramente descendente conforme incrementó el tiempo de reacción, disminuyendo de 3.86 ± 0.02 a 3.65 ± 0.02 debido a la descomposición de la CA y generación de compuestos ácidos. Pero, a diferencia de este trabajo en donde se modificaron los tiempos de reacción, cuando el proceso de CHT es evaluado con incrementos de temperatura, el pH adquiere un comportamiento básico debido a la disminución de especies ácidas en el medio y por lo tanto una hidrólisis más efectiva (Lozano-Pérez y Guerrero-Farjado, 2024). El contenido de humedad presentó valores entre 5.78 ± 0.05 y 8.28 ± 0.19 %, y esto tuvo una relación directa en el contenido de ST como se puede apreciar en la Tabla 3. Los SV indicaron una disminución después del proceso de CHT con respecto a la CA antes de su carbonización, obteniéndose valores de 74.44 ± 0.16 a 74.82 ± 0.12 %, lo cual demostró un comportamiento homogéneo a pesar de los cambios de tiempo de reacción. De manera similar, Masoumi *et al.* (2021), destacaron que, a medida que incrementa el tiempo de reacción existe una mayor eliminación de compuestos volátiles, debido a la disminución de los compuestos orgánicos que conforman la materia volátil, mientras que los compuestos inorgánicos tienden a concentrarse. Ahora bien, los compuestos inorgánicos conforman las cenizas y se observó que la CA después del proceso de CHT incrementó su contenido de cenizas en los hidrochares, obteniéndose valores de 25.18 ± 0.12 , 25.56 ± 0.16 y 25.26 ± 0.20 % para los tiempos de reacción de 1, 2 y 3 horas, respectivamente. Estos valores son cercanos a los reportados por Yang *et al.* (2021), ya que encontraron hidrochar procedente de CA con 21.99 % de cenizas. Así mismo, la CE de los hidrochares tuvo valores superiores en comparación con la CA sin carbonizar, pero se observó que a medida que incrementa el tiempo de reacción, hay una disminución en este parámetro. Este comportamiento descendente observado de la CE es congruente, debido a que (Pauline y Joseph, 2020) reportaron que la CE disminuye su valor a medida que se prolonga el tiempo de reacción de la CHT, debido a una producción mayor en la cantidad de grupos funcionales oxigenados, lo cual irrumpe la conductividad eléctrica.

Tabla 3. Resultados de la caracterización de hidrochares obtenidos a 200 °C durante tres tiempos de reacción diferentes

Tiempo de reacción (h)	Parámetro										
	pH	Hum. (%)	ST (%)	SV (%)	Cen. (%)	CE (μS/cm)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
1	3.86 ± 0.02	6.05 ± 0.05	93.95 ± 0.05	74.82 ± 0.12	25.18 ± 0.12	792.67 ± 6.81	39.41 ± 0.24	4.77 ± 0.03	0.30 ± 0.00	0.00 ± 0.04	30.33
2	3.84 ± 0.02	5.78 ± 0.05	94.22 ± 0.05	74.44 ± 0.16	25.56 ± 0.16	766.67 ± 12.90	40.67 ± 0.29	4.79 ± 0.02	0.23 ± 0.00	0.00 ± 0.00	28.75
3	3.65 ± 0.02	8.28 ± 0.19	91.72 ± 0.19	74.74 ± 0.20	25.26 ± 0.20	663.67 ± 8.33	41.00 ± 0.41	4.71 ± 0.03	0.23 ± 0.02	0.00 ± 0.03	28.77

El análisis elemental de los hidrochares presentó un incremento en el contenido de C a medida que se prolongó el tiempo de reacción, creando una ligera tendencia positiva. El contenido de C para los hidrochares obtenidos a 1, 2 y 3 horas fue de 39.41 ± 0.24 , 40.67 ± 0.29 y 41.00 ± 0.41 %, respectivamente. Mientras tanto, Yang *et al.* (2021), reportaron

un valor muy cercano el cual fue 41.56 %, sin embargo; Nizamuddin *et al.* (2018) y Hossain *et al.* (2020) encontraron 47.2 % de C. Así mismo, en la Tabla 3 se puede notar una disminución en las concentraciones de H y O a medida que se incrementa el tiempo de reacción, debido a que las reacciones responsables de estas disminuciones son la deshidratación y descarboxilación (Masoumi *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). El incremento en los porcentajes de C y la disminución en los porcentajes de H y O, como resultado de la CHT, son debido a la descomposición de la CA, es decir; a medida que el H y el O se eliminan como H₂O y CO₂, el C se concentra en el hidrochar. Finalmente, la concentración de N fue muy baja en comparación con el CHO y la presencia de S fue prácticamente despreciable.

Hum. = Humedad, Cen. = Cenizas

Análisis del PCS del hidrochar proveniente de la cascarilla de arroz

A partir de la Ecuación 1, los resultados del PCS para el hidrochar de 1, 2 y 3 horas fueron de 15.71, 16.33 y 16.36 MJ/kg, respectivamente, como se presenta en la Tabla 4. Debido a este comportamiento, se observó que a medida que incrementa el tiempo de reacción, mayor es el PCS obtenido por el hidrochar. Pero se presentó una limitante, la cual fue el contenido de cenizas del hidrochar, ya que no permite obtener un PCS mayor a pesar del incremento en el tiempo de reacción de la carbonización hidrotérmica. Por ejemplo, para el caso de los hidrochares obtenidos durante 2 y 3 horas, existió una diferencia de 0.03 MJ/kg en el PCS. Haciendo una comparación de estos resultados con otros autores, se encontró que Nizamuddin *et al.* (2018), realizaron una CHT a mayor temperatura y menor tiempo, obteniendo 16.10 MJ/kg, mientras que Hossain *et al.* (2020), trabajaron a una temperatura y tiempo de reacción menores obteniendo un PCS de 20.27 MJ/kg, pero con un contenido de cenizas del 9.4 %. Las similitudes o diferencias de los resultados de esta investigación con respecto a los demás autores, pueden también ser atribuidos a la región en la cual el arroz fue cultivado, a las prácticas agrícolas del cultivo de arroz y a la composición fisicoquímica de la CA como materia de la CHT. Finalmente, los hidrochares procesados por medio de CHT a partir de la CA, se pueden aplicar en la generación de calor y electricidad por medio de combustión en sustitución de combustibles como el carbón vegetal.

Tabla 4. Resultados del PCS de los hidrochares a partir de la CA bajo diferentes condiciones de reacción y su comparación con otros autores

Autor	Condición de operación	PCS (MJ/kg)
Nizamuddin <i>et al.</i> (2018)	220 °C / 30 min	16.10
Hossain <i>et al.</i> (2020)	180 °C / 20 min	20.27
Resultados de la presente investigación	200 °C / 1 h	15.71
	200 °C / 2 h	16.33
	200 °C / 3 h	16.36

Conclusiones

Esta investigación tuvo como propósito realizar la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz procedente de una planta procesadora de alimentos para producir hidrochar como biocombustible a 200 °C y tiempos de 1, 2 y 3 horas. La cascarilla de arroz resultó ser un residuo con bajo contenido de humedad, la cual tuvo que ser hidratada, pero con características valorizables, entre ellas su contenido de C, para aplicar un tratamiento termoquímico como la carbonización hidrotérmica y aprovechar una biomasa que no cuenta con un adecuado plan de gestión. Derivado de la carbonización hidrotérmica, se obtuvieron tres productos: hidrochar, agua de proceso y gas de síntesis, siendo el hidrochar el producto más abundante con un rendimiento superior al 70 %. A partir de la caracterización del hidrochar, se observó que es un producto con pH ácido y con elevada presencia de cenizas atribuidas a la cantidad de sílice como material inherente de la cascarilla de arroz. El PCS tuvo valores entre 15.71 y 16.36 MJ/kg, lo cual indicó que en términos de tiempo de reacción, con una hora bastaría mejorar el PCS con relación a la cascarilla de arroz sin carbonizar. El proceso de carbonización hidrotérmica demostró aportar una reducción en el volumen de la cascarilla de arroz y obtener un biocombustible como el hidrochar.

Como trabajos futuros, se esperan analizar otras condiciones de operación del proceso de carbonización hidrotérmica con la finalidad de analizar la factibilidad del proceso en términos de rendimiento y PCS, así como evaluar el agua de proceso como producto para otras aplicaciones.

Agradecimientos y financiamiento: Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para la realización de esta investigación por medio del proyecto financiado con número 22524.25-P. A la SECIHTI por la beca nacional con número de registro 4008729.

Bibliografía

- Bushra, B., & Remya, N. (2020). Biochar from pyrolysis of rice husk biomass – characteristics modification and environmental application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 5759–5770. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01092-3>
- Chen, Z., Gou, Y., & Lou, L. (2024). A critical review of hydrochar based photocatalysts by hydrothermal carbonization: synthesis, mechanisms, and applications. *Biochar*, 6, 74. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00364-9>
- Danso-Boateng, E., Mohammed, A. S., Sander, G., Wheatley, A. D., Nyktari, E., & Usen, I. C. (2021). Production and characterisation of adsorbents synthesised by hydrothermal carbonisation of biomass wastes. *SN Applied Sciences*, 3, 257. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04273-5>
- Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11(4), e42491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>
- Higgins, L. J. R., Brown, A. P., Harrington, J. P., Ross, A. B., Kaulich, B., & Mishra, B. (2020). Evidence for a core-shell structure of hydrothermal carbon. *Carbon*, 91, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.060>
- Hossain, N., Nizahuddin, S., Griffin, G., Selvakannan, P., Mubarak, N. M., & Indra-Mahlia, T. M. (2020). Synthesis and characterization of rice husk biochar via hydrothermal carbonization for wastewater treatment and biofuel production. *Scientific Reports*, 10, 18851. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75936-3>
- Ighalo, J. O., Akaeme, F. C., Georgin, J., De Oliveira, J. S., & Franco, D. S. P. (2025). Biomass hydrochar: A critical review of process chemistry, synthesis methodology, and applications. *Sustainability*, 17(4), 1660. <https://doi.org/10.3390/su17041660>
- Ischia, G., Berge, N. D., Bae, S., Marzban, N., Román, S., Farru, G., Wilk, M., Kulli, B., & Fiori, L. (2024). Advances in research and technology of hydrothermal carbonization: Achievements and future directions. *Agronomy*, 14(5), 955. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050955>
- Jia, J., Wang, R., Chen, H., Liu, H., Xue, Q., Yin, Q., & Zhao, Z. (2022). Interaction mechanism between cellulose and hemicellulose during the hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Energy Science & Engineering*, 10, 2076–2087. <https://doi.org/10.1002/ese3.1117>
- Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M. I., & Ahmadikhah, A. (2023). Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, 31(1), 14–32. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005>
- Li, Y., Hagos, F. M., Chen, R., Qian, H., Mo, C., Di, J., Gai, X., Yang, R., Pan, G., & Shan, S. (2021). Rice husk hydrochars from metal chloride-assisted hydrothermal carbonization as biosorbents of organics from aqueous solution. *Bioresources and Bioprocessing*, 8. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00451-w>
- Lozano-Pérez, A. S., & Guerrero-Farjado, C. A. (2024). Liquid Hot Water (LHW) and hydrothermal carbonization (HTC) of coffee berry waste: Kinetics, catalysis and optimization for the synthesis of platform chemicals. *Sustainability*, 16(7), 2845. <https://doi.org/10.3390/su16072854>
- Masoumi, S., Borugadda, V. B., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Hydrochar: A review on its production technologies and applications. *Catalysts*, 11, 939. <https://doi.org/10.3390/catal11080939>
- Meninno, S. (2023). Organocatalytic upgrading of biomass derived building blocks. *European Journal of Organic Chemistry*, 26. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202300264>
- Naranjo, J., Juiña, E., Loyo, C., Romero, M., Vizuete, K., Debut, A., Ponce, S., & Murillo, H. A. (2023). Preparation of adsorbent materials from rice husk via hydrothermal carbonization: Optimization of operating conditions and alkali activation. *Resources*, 12(12), 145. <https://doi.org/10.3390/resources12120145>
- Nizamuddin, S., Hussain-Siddiqui, M. T., Ahmed-Baloch, H., Mujawar-Mubarak, N., Griffin, G., Madapusi, S., & Tanksale, A. (2018). Upgradation of chemical, fuel, thermal, and structural properties of rice husk through microwave-assisted hydrothermal carbonization. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 17529–17539. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1876-7>
- Nwajiaku, I. M., Olanrewaju, J. S., Sato, K., Tokunari, T., Kitano, S., & Masunaga, T. (2018). Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at varying pyrolytic temperatures. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7, 269–276. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0213-y>
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2023). Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 4, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- Ojeda-Rodríguez, V. E., Escobar-Morales, B., Méndez-Contreras, J. M., Vallejo-Cantú, N. A., Alvarado-Lassman, A., & Rosas-Mendoza, E. S. (2024). Cascarilla de arroz, un residuo agrícola sin ser aprovechado en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 105–110. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.319>
- ONU. (2017). Organización de las Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. <https://www.un.org/es/desa/world-population-prospects-2017>
- Orzama-Hugo, R., Naranjo, J., Gavilanez-Alvarez, I., Cando, V. M., Tixi-Gallegos, K., Sánchez-Moreno, H., Londo, F., Danilo-Gavilanez, O., & Coello-Cabezas, J. (2024). Production of hydrochar by low-temperature hydrothermal carbonization of residual biomass from cocoa production for mercury adsorption in acidic aqueous solutions. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100938. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100938>

- Pagés-Díaz, J., & Huiliñir, C. (2020). Valorization of the liquid fraction of co-hydrothermal carbonization of mixed biomass by anaerobic digestion: Effect of the substrate to inoculum ratio and hydrochar addition. *Bioresource Technology*, 317, 123989. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123989>
- Parikh, P. P., & Channiwal, S. A. (2002). A unified correlation for estimating HHV for solid, liquid and gaseous fuel. *Fuel*, 81, 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Pauline, A. L., & Joseph, K. (2020). Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters. *Fuel*, 279, 118472. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118472>
- Romano, P., Stampone, N., & Di Giacomo, G. (2023). Evolution and prospects of hydrothermal carbonization. *Energies*, 16(7), 3125. <https://doi.org/10.3390/en16073125>
- Selvaraj, P. S., Ettiyagounder, P., Sabarish, K., Periasamy, K., Rengasamy, B., Veeraswamy, D., Karchiyappan, T., & Kathirvel, S. (2025). Hydrothermal carbonization approach for transforming biomass waste to value added hydrochar and its applications in water remediation. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101199. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101199>
- SIAP. (2023a). *Expectativas agroalimentarias 2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- SIAP. (2023b). *Panorama agroalimentario: Agricultura regenerativa, la vía para un futuro sustentable*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- Steven, S., Restiawaty, E., & Bindar, Y. (2021). Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111329>
- Yang, L., Wang, H., Zhu, J., Sun, W., Xu, Y., & Wu, S. (2021). Co-combustion and ash characteristics of Zhonggong coal with rice husk hydrochar prepared by the hydrothermal carbonization technology for co-combustion. *Renewable Power Generation*, 16(2), 329–338. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12324>