

Artículo de Revisión

**REVISIÓN DE LA CONVERSIÓN HIDROTÉRMICA PARA
LA OBTENCIÓN DEL HIDROCHAR**

**REVIEW OF HYDROTHERMAL CONVERSION
FOR HYDROCHAR PRODUCTION**

Wendy Lucia Duharte Rodríguez^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-0385-7926>

Leyanet Odales Bernal¹ <https://orcid.org/0000-0001-7907-2805>

Ernesto Luis Barrera Cardoso¹ <https://orcid.org/0000-0003-0207-4188>

¹ Unidad de Desarrollo e Innovación Centro de Estudio de Energía y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez" (UNISS), Cuba.

Recibido: Junio 6, 2025; Revisado: Julio 7, 2025; Aceptado: Agosto 14, 2025

RESUMEN

Introducción:

La carbonización hidrotérmica (HTC, por sus siglas en inglés) es una técnica termoquímica que convierte biomasa húmeda, como el agotado de la gallinaza, en energía y productos químicos sin necesidad de un pretratamiento. El hidrochar obtenido es un material carbonoso valioso, utilizado para enmiendas de suelos, almacenamiento de energía y como aditivo en reacciones químicas, destacando su potencial en la valorización de residuos.

Objetivo:

Identificar las condiciones del proceso del HTC para la obtención del hidrochar del agotado de la gallinaza, a partir de las similitudes de residuos lignocelulósicos, lodos y estiércoles.

Materiales y Métodos:

Se utilizaron como métodos de la investigación, el histórico lógico, la deducción – inducción, el análisis crítico, el sistémico y la revisión documental de tesis de doctorado, artículos y libros, para comprender mejor el proceso de formación del hidrochar con características similares al agotado de la gallinaza.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Wendy L. Duharte, Email: wen200895@gmail.com



Resultados y Discusión:

Se examinaron las características fisicoquímicas del proceso de carbonización de diversos residuos, que puede seguir dos vías: disolución de productos intermedios por polimerización y descomposición, ambas influenciadas por la severidad hidrotérmica y la temperatura. La adsorción y reactividad del hidrochar se deben a los grupos funcionales oxigenados en su superficie.

Conclusiones:

Se identificaron las brechas del conocimiento para la formación del hidrochar a partir del agotado de la gallinaza, a través de las similitudes con residuos similares, y las perspectivas para aprovechar el gran potencial que provee el proceso de HTC, para la valorización de residuos complejos de tratar por vías convencionales.

Palabras clave: carbonización hidrotérmica; gallinaza; hidrochar.

ABSTRACT

Introduction:

Hydrothermal carbonization (HTC) is a thermochemical technique that converts wet biomass, such as spent poultry litter, into energy and chemicals without pretreatment. The resulting hydrochar is a valuable carbonaceous material used for soil amendments, energy storage, and as an additive in chemical reactions, highlighting its potential for waste recovery.

Objective:

To identify the process conditions of hydrothermal carbonization (HTC) for obtaining hydrochar from spent poultry litter, based on the similarities with lignocellulosic residues, sludge, and manure.

Materials and Methods:

The research methods used in this study include historical-logical, deduction-induction, critical analysis, systemic analysis and documentary review of dissertations, articles and books. The results and discussion of this study provide a better understanding of the formation process of hydrochar with characteristics similar to those of spent poultry litter.

Results and Discussion:

The physicochemical characteristics of the carbonization process of different residues were analyzed, which can assume two distinct pathways: the dissolution of intermediate products through polymerization and decomposition, both influenced by hydrothermal severity and temperature.

The adsorption capacity and reactivity were conferred by the presence of oxygenated functional groups in the surface structure of the hydrocarbons.

Conclusions:

The study identifies gaps in the knowledge of hydrochar formation from poultry litter digestion and highlights the potential of the HTC process for valorizing difficult to treat wastes.

Keywords: hydrothermal carbonization; poultry litter; hydrochar.

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático y las consecuencias perjudiciales previstas en un corto plazo, exigen nuevas soluciones para la gestión, el reciclaje y la valorización de la enorme masa de desechos que se producen de forma continua. En Cuba, existen alrededor de 220 granjas avícolas con 13 834 miles de cabezas en total, a finales del 2023 se habían generado una acumulación aproximadamente 0,76 millones de toneladas de residuos provenientes de esta industria (gallinaza, cartón, vidrio, fármacos) (ONEI, 2024).

La gallinaza (G), considerada uno de los residuos que más se genera y contamina en la producción avícola, es una mezcla de heces, orina, porción no digerible de alimentos, microorganismos de la biota intestinal, plumas, huevos rotos, que se obtiene de la gallina enjaulada o de piso (Katuwal et al., 2023). Una lixiviación espontánea de la G puede provocar acidificación de la tierra, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, emisión de GEI o la formación de material particulado (Bi et al., 2020). A partir del proceso de lixiviación, se obtienen dos fracciones: una líquida y otra sólida, conocida como agotado de la gallinaza (AG), rica en nutrientes, compuestos lignocelulósicos, patógenos y un alto contenido de humedad (Katuwal et al., 2023). El tratamiento por vías bioquímicas suele estar limitado: por la baja relación carbono/nitrógeno (C/N), las altas concentraciones de nitrógeno, los altos valores de pH y de sólidos, la presencia de antibióticos y microplásticos, que reducen la eficiencia del proceso de hidrólisis o la inhibición (Santos et al., 2017; Wei y col., 2021). Sin embargo, el proceso por conversión hidrotérmica (HTC, por sus siglas en inglés) ofrece un mejor aprovechamiento del AG (Cavali y col., 2022). Este permite el tratamiento de residuos húmedos de naturaleza compleja, lo que resulta una reducción del consumo energético durante el proceso, además de lograr la esterilización de los patógenos presentes en los estiércoles (Hejna et al., 2022).

Sin embargo, se necesitan estudios más detallados para comprender mejor el HTC del AG, sus productos y sus aplicaciones. Por las limitadas investigaciones que se han encontrado en la literatura, sobre la aplicación en Cuba de las condiciones del proceso de HTC (temperatura, tiempo, pH,) para el AG, se hace necesario establecer el estudio de residuos con características similares que permitan identificar los mecanismos de reacción y los elementos involucrados para la formación de los productos. Por lo que, esta revisión estará enfocada en identificar las condiciones del proceso del HTC para la obtención del hidrochar del agotado de la gallinaza, a partir de las similitudes de residuos lignocelulósicos, lodos y estiércoles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura, con el objetivo de profundizar en el proceso de formación del hidrochar a partir de diversos residuos que presentan características similares al agotado de gallinaza. Para el análisis crítico, se emplearon métodos de investigación histórico-lógicos, así como enfoques deductivo-inductivos y sistémico-estructurales. Se extrapolaron principios generales a partir de estudios de casos y teorías relacionadas con estiércoles, lodos y digestatos, además de inducir patrones específicos para el agotado de gallinaza, considerando parámetros

cuantificables, el análisis de mecanismos de reacción y las propiedades del hidrochar. La recopilación de datos se realizó a través de bases de datos como Scopus, Web of Science y SciELO, así como de repositorios académicos como SpringerLink y ScienceDirect, abarcando un intervalo de diez años, con especial énfasis en los últimos cinco años.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los procesos de conversión de biomasa abarcan una variedad de técnicas con el objetivo de transformarla en formas útiles de energía. Estos incluyen métodos físicos, termoquímicos, como la pirólisis, la combustión, la gasificación, así como bioquímicos y químicos (Danso & Achaw, 2022). En la tabla 1 se muestra un resumen comparativo de las ventajas y desventajas de estos métodos empleados en biomásas similares al AG. Para la comparación se utilizaron términos relacionados con la eficiencia, costos e impacto ambiental, lo que determina su viabilidad y conveniencia para el aprovechamiento (Manogaran et al., 2022; Ighalo et al., 2025).

Tabla 1. Métodos de conversión de la biomasa: ventajas y desventajas

Parámetro	Pirólisis	Conversión biológica	Conversión hidrotérmica
Enfoque y objetivo	Pirólisis lenta o rápida, producción de biocarbón, bioaceite y gases como CO, CO ₂ , CH ₄ y H ₂	Fermentación o digestión anaerobia producción de bioetanol y biogás.	Carbonización, licuefacción y gasificación, producción de hidrocarburos, biocombustibles y gas
Temperatura óptima (°C)	400-600	35-55 (mesofílica) 55-70 (termofílica)	180-250
Humedad tolerada (%)	≤10	≤20	≤90
Rendimiento sólido (% peso seco)	20-35 (biochar)	30-50 (digestato)	40-70 (hidrochar)
Poder calorífico (MJ/kg)	25-30	15-20 (biogás)	10-30 (hidrochar)
Recuperación de nutrientes (%) y eliminación de metales	P(fósforo): 80-90	N: 50-70; P: 60-80 los metales se quedan en el digestato	N: 60-80; P: 80-95 los metales quedan concentrados en el HC
Tiempo proceso (horas)	0,5-2	240-720	0,02-12
Remoción patógenos (%)	>99,9	<50 (mesofílica) >90 (termofílica)	>99,9
Emisiones CO ₂ -eq (kg/t)	150-250	50-100	30-80

Ventajas	Alta eficiencia y flexibilidad	Menores requisitos de consumo de energía para desarrollar el proceso	Se puede aplicar directamente la biomasa con alta humedad
Desventajas	No apto para residuos de biomasa con alto contenido de humedad	El período es largo, y los altos contenidos de sólidos y nitrógeno pueden inhibir el proceso	Los altos requisitos de equipamiento

La combustión directa no sería adecuada para el AG, debido a su alto contenido de agua y nitrógeno (N). De igual manera, la digestión anaerobia puede no ser una alternativa apropiada, debido al alto contenido de sólidos y nitrógeno de los residuos avícolas, lo que inhibiría la actividad metanogénica. En Cuba se han realizado investigaciones sobre la pirólisis y la torrefacción para residuos con un porcentaje de humedad menor del 10%, principalmente residuos forestales y de cosecha (Alba et al., 2018) y la digestión anaerobia de estiércoles y residuos de cosecha, en mono o codigestión (López et al., 2022; López et al., 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, la conversión hidrotérmica es una tecnología prometedora para la producción de biocombustibles a partir de materias primas con mayor contenido de humedad, ya que no requiere ningún secado previo, lo que reduce considerablemente el consumo de energía, gastos operativos y el tratamiento a grandes volúmenes de residuos como el AG. El agua contenida en el agotado se puede utilizar directamente como medio de reacción (Cavali et al., 2023).

3.1 Proceso de conversión hidrotérmica

De acuerdo con el diagrama de fases del agua y sus diversas regiones por encima de la presión de vapor y la temperatura crítica, la conversión hidrotérmica puede clasificarse como gasificación hidrotérmica (HTG), licuefacción hidrotérmica (HTL) y carbonización hidrotérmica (HTC) (Biller & Ross, 2016; Peterson et al., 2008). Para el caso de este último proceso, se obtienen tres productos principales: gases de HTC, licor de HTC y como resultado de la densificación de energía debido a la desoxigenación, un biocarbón denominado hidrochar (HC) como producto mayoritario (Ighalo et al., 2025). Las temperaturas de reacción para la obtención del HC se aplican dentro de un intervalo de 180- 250 °C, y las presiones se mantienen por encima de la presión de saturación correspondiente (1- 4 MPa) para asegurar el estado líquido del agua y valores de pH 5-6 y el tiempo de trabajo puede durar entre 0,5 minutos - 12 horas en atmósfera inerte (Biller & Ross, 2016; Ghanim et al., 2016). Este proceso es relativamente homogéneo, de circuito cerrado, sin emisiones olfativas ni acústicas, por lo que no necesita realizar métodos de separación incluso, para algunos restos orgánicos problemáticos cuya eliminación hoy día es muy costosa (Islam et al., 2022).

3.2 Reacciones para la obtención del hidrochar

Durante la HTC se producen una serie de reacciones de hidrólisis, condensación, descarboxilación, deshidratación y aromatización (Karaeva et al., 2023). Los residuos

agropecuarios generados en actividades agrarias, ganaderas o silvícolas están compuestos en su mayoría de lignocelulosa, que es un complejo polimérico de carbohidratos de celulosa, hemicelulosa y lignina. La fractura de la biomasa bruta es diferente a la descomposición de componentes individuales debido a las fuertes conexiones, incluidos los enlaces covalentes y los enlaces de hidrógeno. Falco et al. (2011), informaron que la temperatura durante la formación del HC derivado de la paja de centeno cambió a valores más altos en comparación con la celulosa pura. Por tanto, se pueden conseguir materiales totalmente carbonizados a partir de la materia prima pura. Esto confirma que la lignocelulosa cruda requiere una mayor energía de activación para alterar la estructura de los componentes individuales.

La producción de hidrocarburos no solo depende de la composición de la lignocelulosa, sino que también está determinada por las condiciones hidrotermales (Ighalo et al., 2025). Generalmente, el nivel de degradación del componente de lignocelulosa sigue el orden lignina < celulosa < hemicelulosa con la misma severidad hidrotermal. La estructura fenólica de la lignina es la principal razón de la estabilidad y la reacción de condensación (Kang et al, 2012). En comparación con la celulosa que tiene una estructura parcialmente cristalina, la hemicelulosa tiene una masa molar más baja con un menor grado de polimerización (aproximadamente 50 - 200 g/mol) y sus propiedades amorfas significan que es más vulnerable en el entorno hidrotermal crítico. Estudios realizados por Dinjus et al. (2011) reportaron que un alto contenido de lignina daba como resultado que la estructura inicial de la lignocelulosa cruda se retuviera en el producto sólido, convirtiéndose únicamente los constituyentes solubles. Además, la relación agua/biomasa tiene un efecto significativo en el rendimiento del HC y puede cambiar la intensidad de reacción correspondiente a la tasa de variación máxima (Guo et al., 2016; Farru et al., 2024).

De forma general, en la hidrólisis ocurre la ruptura de enlaces éteres y ésteres en las macromoléculas por la adición de un mol de agua. De esta forma, se obtendrían como productos sacáridos u oligosacáridos a partir de la celulosa y fragmentos fenólicos a partir de la lignina (Ighalo et al., 2025). La condensación en HTC está marcada principalmente por una condensación polimérica (ejemplo aldol-condensación) influyendo en la tasa de carbonización debido a la condensación aromática (Biller & Ross, 2016). El proceso de despolimerización es más lento que la hidrólisis de carbohidratos debido a que el enlace peptídico en la proteína es más estable que el β -1. Por otra parte, varios aminoácidos, incluidos leucina, isoleucina, fenilalanina, serina, treonina e histidina, son inestables a pH ácido y casi neutro, por lo que la posibilidad de que ocurra la despolimerización en el AG será limitada debido a los altos valores de pH que presenta esta biomasa. En la tabla 2 se resumen las reacciones del HTC con respecto al intervalo de temperatura de los principales componentes de la biomasa (Smith & Ross, 2019; Ighalo et al., 2025).

La fracción de carbohidratos puede experimentar una ruta similar a la lignocelulosa para la hidrólisis de oligosacáridos a monosacáridos, que sufrirían reacciones adicionales para formar hidrocarburos (Funke & Ziegler, 2010). Las proteínas del agua prensada, primero se hidrolizan en aminoácidos rompiendo el enlace peptídico, que es un enlace C-N entre los grupos carboxilo y amina (Peterson et al., 2008). Sin embargo, la

formación de la estructura depende tanto de las condiciones hidrotermales, si domina el proceso similar a la pirólisis o la vía de reacción de policondensación intermedia.

Tabla 2. Reacciones del HTC con respecto al rango de temperatura de los principales componentes de la biomasa

<i>Temperaturas (°C)</i>	<i>Reacciones</i>
150	Se mantiene inerte la mayor parte de la lignina
180-250	Se degradan los grupos carboxílicos y carbonilos Ocurren reacciones de condensación por polimerización y aromatización Formación de materiales carbonosos funcionalizados Se hidroliza la hemicelulosa
200-230	Se hidroliza la celulosa
220-260	Se degrada la lignina

En la figura 1 se muestra la ruta de hidrólisis / condensación donde los enlaces éter y éster sufren ataque nucleofílico por parte del agua en estado subcrítica, obteniendo las conformaciones más estables, propiciando una mayor obtención de HC partiendo del AG.

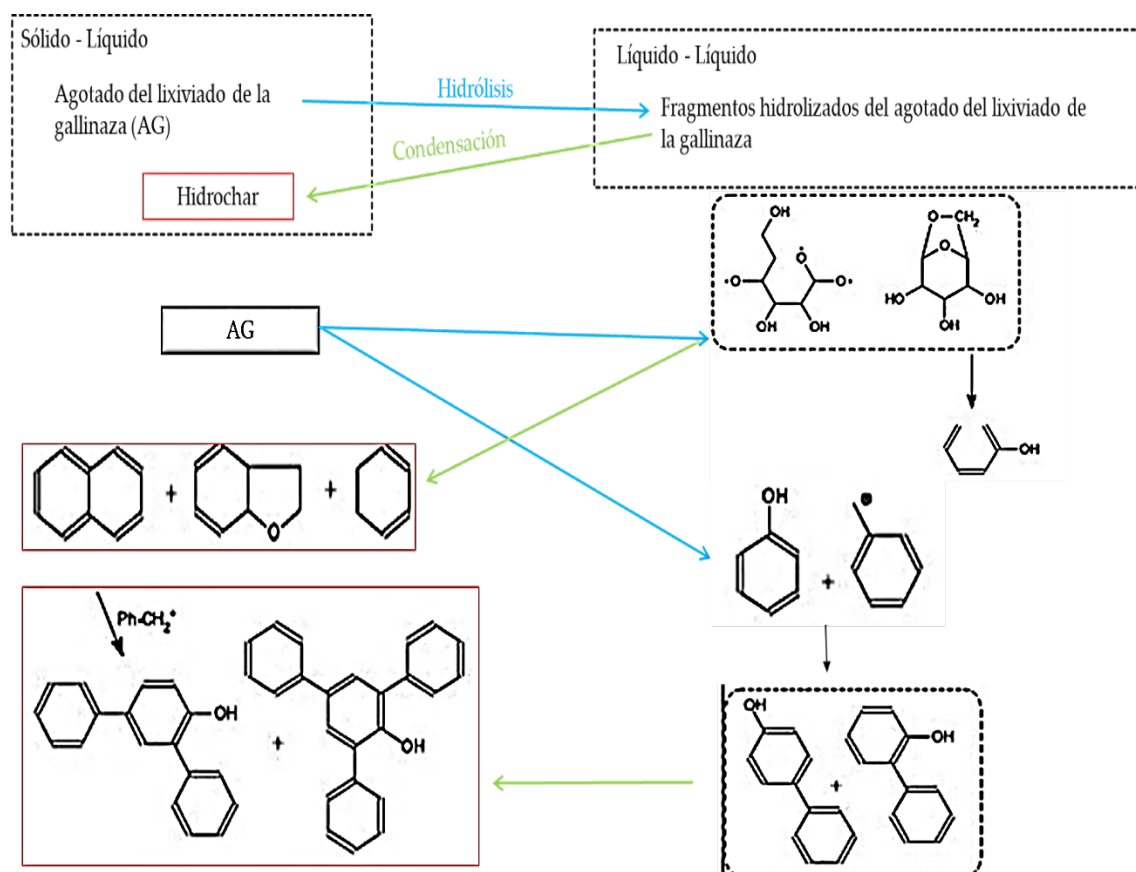


Figura 1. Ruta simplificada de obtención de HC a partir de proteínas y aminoácidos, hidrólisis (línea azul) seguida de descarboxilación y luego la condensación (línea verde), aplicada al agotado del lixiviado de la gallinaza

Fuente: Adaptación de Masoumi et al. (2021), Ighalo et al. (2025)

Uno de los inconvenientes al procesar residuos húmedos o biosólidos como desechos municipales, lodo de aguas residuales y estiércoles es la presencia de metales pesados, patógenos y compuestos biológicamente activos, las altas temperaturas del HTC permiten su esterilización (Hejna et al., 2022; Karaeva et al., 2023). El AG es un residuo complejo rico en sustancias orgánicas y nutrientes, compuesto por microorganismos, proteínas, carbohidratos y lípidos y sus productos de descomposición; material orgánico no digerido; y material inorgánico como sales que hacen difícil su tratamiento, debido a que un gran componente de proteína se deriva de bacterias y del pienso no degradado del alimento, las vías de reacción de la AG serán marcadamente diferentes. En consecuencia, es fundamental explorar el comportamiento de las proteínas en el ambiente hidrotérmico.

3.3 Características del hidrochar

La calidad y propiedades finales del HC dependen críticamente de dos factores: el tipo de materia prima utilizada y las condiciones del HTC, especialmente la temperatura (Viaene et al., 2023). Estudios demuestran que temperaturas más elevadas favorecen la desoxigenación y condensación de compuestos aromáticos, incrementando el contenido energético del HC (Biller & Ross, 2016). El HC se considera un sólido homogéneo, rico en carbono y energía, con una densidad energética comparable a la del lignito, conservando la mayoría de los compuestos orgánicos presentes en la materia prima original (Masoumi et al., 2021). El análisis próximo y final del HC permite garantizar la caracterización eficiente como combustible, lo que incluye la medición de la materia volátil, cenizas y el contenido de carbono fijo, las relaciones H/C y O/C para estimar el grado de desoxigenación y el contenido aromático durante el HTC, además la comparación con hidrocarburos usando un diagrama de Van Krevelen, donde el cambio de relación puede delinear las vías de reacción; la deshidratación (producción de H₂O) y descarboxilación (producción de CO₂ o carbonilos, incluidos los ácidos carboxílicos) durante el HTC (Biller & Ross, 2016; Farru et al., 2024).

En la tabla 3 se aprecian las principales propiedades de HC obtenidas a partir de diferentes residuos. Todos los materiales analizados presentan un contenido de humedad similar, lo que permite tenerlos de referentes para próximos análisis del AG. Sin embargo, las diferencias en el contenido de cenizas, N y las relaciones atómicas sugieren que cada tipo de material tiene características únicas que pueden influir en su idoneidad para la producción de HC y su aplicación como biocombustible. Los lodos tienen el contenido de N más alto (3-8 %), lo que sugiere que pueden ser más nutritivos para las plantas. Por otro lado, el digestato presenta el contenido más bajo (1-4 %), lo que podría limitar su uso en aplicaciones agrícolas. Las relaciones atómicas O/C y H/C también muestran variaciones, siendo los lodos los que presentan la relación O/C más alta (0,30-0,40), lo que puede indicar una mayor estabilidad y menor potencial de descomposición. El poder calorífico del HC, sobre una base seca, oscila entre 15 y 17 MJ/kg para la biomasa inicial (Smith & Ross, 2019; Ighalo et al., 2025), alcanzando densificaciones energéticas de hasta 1,5 y valores tan altos como 30 MJ/kg. Esto implica que el digestato, con un HHV de aproximadamente 20 MJ/kg, podría ser el más eficiente en términos de energía cuando se utiliza como biocombustible.

Tabla 3. Características del hidrochar obtenidos por diferentes residuos

Parámetros	Estiércoles	Lodos	Digestato
% Humedad	~ 90	~ 90	~ 90
% Cenizas	10-20	20-50	30-60
% O	35-45	~ 50	20-40
% N	3-6	3-8	1-4
Relación atómica O/C	0,20-0,30	0,30-0,40	0,25-0,35
Relación atómica H/C	1,0-1,3	1,3-1,6	1,2-1,5
HHV(MJ/kg)	10-20	~14	~ 20
Área superficial (m ² /g)	20-50	50-100	40-80
Tamaño de partícula (µm)	1-10000	1-100000	1-10000
Referencias	(Ghanim et al., 2016; Gasco et al., 2018; Celletti et al., 2021)	(Hamalainen et al., 2021; Roslan et al., 2023)	(Cao et al., 2019; Al Ramahi et al., 2021; Farru et al., 2024)

La caracterización morfológica del HC, realizada por microscopía electrónica de barrido, revela estructuras esféricas, superficies rugosas o porosas, y laminación (Islam et al., 2022). Los polímeros colapsables, como la hemicelulosa, pueden descomponerse más fácilmente en fragmentos que conducen a una superficie rugosa e incluso porosa en el residuo sólido (Manogaran et al., 2022). Estos pequeños fragmentos luego se fundirán o formarán esferas carbonáceas en la superficie. Teniendo una mayor hidrofobicidad que mejora la deshidratación, por lo que se puede moler más fácilmente que la biomasa de partida, mejorando potencialmente sus propiedades de manejo (Mau et al., 2018; Ighalo et al., 2025). Estas características han agregado beneficios para mejorar la seguridad de los productos obtenidos por HTC, permitiendo la recuperación y la reutilización de nutrientes, el pretratamiento del agua del proceso y la descarga de efluentes.

3.4 Aplicaciones del hidrochar

Se reportan varios usos importantes asociados al HC por la presencia de grupos funcionales de superficie reactiva y estructura porosa, alternativa para la sustitución del costoso carbón activado (Ighalo et al., 2025), enmiendas del suelo, por el alto contenido de nutrientes minerales, adsorbente de bajo costo para contaminantes en soluciones acuosas para la generación de materiales nanoestructurados, utilización como electrodos en baterías de litio para el almacenamiento de electricidad, fotocátalisis (Zhang et al., 2018; Islam et al., 2022), así como para la adsorción (Jia et al., 2021; Kahilu et al., 2022) y secuestro de CO₂ (Danso et al., 2015). Además, se ha aplicado en el proceso de digestión anaerobia para promover la producción de biogás, actuando como soporte para las colonias de bacterias, conductor de la transferencia de electrones entre especies, absorbente de inhibidores indirectos y reactivo en la metanización (Danso et al., 2020).

Si bien persisten desafíos, como la escalabilidad de la producción y la necesidad de un control de calidad constante, las perspectivas generales del mercado se mantienen excepcionalmente positivas, lo que sugiere una expansión significativa tanto del tamaño del mercado como de la diversidad de aplicaciones en los próximos años. Para el caso de Cuba, esta aplicación podría ser muy solicitada para el pretratamiento y postratamiento de estiércoles, residuos sólidos urbanos y del AG de difícil manejo por su alto contenido de sólidos o humedad, o en la agricultura para la utilización de un biofertilizante más estabilizado y esterilizado.

4. CONCLUSIONES

1. La determinación de los componentes principales permite comprender mejor las reacciones subyacentes y las interacciones en la conversión de biomasa real, durante el proceso de degradación a partir del HTC.
2. La temperatura ejerce una influencia significativa en la determinación de la ruta de reacción más probable durante el proceso de conversión del agotado de gallinaza; la hidrólisis (180-220 °C) genera un carbón primario, mientras la condensación (220-250 °C) forma un carbón secundario estable.
3. El tratamiento a través del HTC y la obtención del hidrochar podría ofrecer múltiples ventajas como la mitigación de problemas ambientales, al fomentar un mayor tratamiento de residuos, obteniendo productos con potencialidades para su valorización como biocombustible o materiales carbonosos.

REFERENCIAS

- Alba, Y., Pérez, M., Chong, N., & Arteaga, L.E. (2018). Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos. *Tecnología Química*, 38(1), 123-137. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100010
- Al Ramahi, M., Keszthelyi-Szabo, G. & Beszedes, S. (2021). Coupling hydrothermal carbonization with anaerobic digestion: an evaluation based on energy recovery and hydrochar utilization. *Biofuel Research Journal*, 8(3), 1444-1453. <http://doi.org/10.18331/BRJ2021.8.3.4>
- Bi, S., Qiao, W., Xiong, L., Mahdy, A., Wandera, S.M., Yin, D., & Dong, R. (2020). Improved high solid anaerobic digestion of chicken manure by moderate in situ ammonia stripping and its relation to metabolic pathway. *Renew Energy*, 146, 2380-2389. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.093>
- Biller, P., & Ross, A. B. (2016). Production of biofuels via hydrothermal conversion. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies*. 2 ed. 509-547. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00017-5>
- Cavali, M., Libardi, N., Dutra, J., Lorenci, A., Soccol, C.R., Belli, P., Bayard, R., Benbelkacem, H., & Borges, A. (2023). A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of The Total Environment*, 857(3), 159627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159627>
- Cao, Z.B., Jung, D., Olszewski, M.P., Arauzo, P.J. & Kruse, A., (2019). Hydrothermal carbonization of biogas digestate: Effect of digestate origin and process conditions.
-

- Waste Management*, 100, 138-150. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.009>
- Cavali, M., Libardi, N., de Almeida, R., Belli, P., Ribeiro, R.H., & Borges, A. (2022). Biochar and hydrochar in the context of anaerobic digestion for a circular approach: An overview. *Science of the Total Environment*, 822, 153614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153614>
- Celletti, S., Bergamo, A., Benedetti, V., Pecchi, M., Patuzzi, F., Basso, D., Baratieri, M., Cesco, S. & Mimmo, T. (2021). Phytotoxicity of hydrochars obtained by hydrothermal carbonization of manure-based digestate. *Journal of Environmental Management*, 80, 111635. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111635>
- Danso, E., & Achaw, O.W. (2022). Bioenergy and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technologies-a review. *AIMS Energy*, 10(4), 585-647. <https://doi.org/10.3934/energy.2022030>
- Danso, E., Nyktari, E., Wheatley, A.D., Holdich R.G., & Mohammed, A.S. (2020). Removal of Organic Pollutants from Effluent of Anaerobic Digester Using Hydrochars Produced from Faecal Simulant and Sewage Sludge. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(192). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04557-3>
- Danso, E., Holdich, R.G., Wheatley, A.D., Martin, S.J., & Shama, G. (2015). Hydrothermal carbonization of primary sewage sludge and synthetic faeces: Effect of reaction temperature and time on filterability. *Environmental Progress Sustainable Energy*, 34(5), 1279-1290. <https://doi.org/10.1002/ep.12114>
- Dinjus, E., Kruse, A., & Tröger, N. (2011). Hydrothermal carbonization -1. Influence of lignin in lignocelluloses. *Chemical Engineering Technology*, 12(34), 2037-2043 <https://doi.org/10.1002/ceat.201100487>
- Falco, C., Baccile, N., & Titirici, M.M. (2011). Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons. *Green Chemistry*, 11, 3273. <https://doi.org/10.1039/C1GC15742F>
- Farru, G., Asquer, C., Cappai, G., De Gioannis, G., Melis, E., Milia, S., Muntoni, A., Piredda M., & Scano, E.A. (2024). Hydrothermal carbonization of hemp digestate: influence of operating parameters. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 6999–7010. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02831-4>
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160-177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- Gasco, G., Paz-Ferreiro, J., Alvarez, M.L., Saa, A. & Mendez, A. (2018). Biochars and hydrochars prepared by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of pig manure. *Waste Management*, 79(1), 395-403. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.015>
- Ghanim, B.M., Shankar, D., Kwapinski, W., & Leahy, J.J. (2016). Hydrothermal carbonization of poultry litter: Effects of treatment temperature and residence time on yields and chemical properties of hydrochars. *Bioresource Technology*, 216, 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.087>
- Guo, S., Dong, X., Wu, T., & Zhu, C. (2016). Influence of reaction conditions and feedstock on hydrochar properties. *Energy Conversion and Management*, 123, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.029>
- Hamalainen, A., Kokko, M., Kinnunen, V., Hilli, T. & Rintala, J. (2021). Hydrothermal
-

- carbonisation of mechanically dewatered digested sewage sludge-Energy and nutrient recovery in centralised biogas plant. *Water Research*, 201(1), 117284. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117284>
- Hejna, M., Świechowski, K., Rasaq, W.A., & Białowiec, A. (2022). Study on the Effect of Hydrothermal Carbonization Parameters on Fuel Properties of Chicken Manure Hydrochar. *Materials*, 15(16), 5564. <https://doi.org/10.3390/ma15165564>
- 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/doi.org/10.3390/su17041660>
- Islam, M.T., Sultana, A.I., Chambers, C., Saha, S., Saha, N., Kirtania, K., & Reza, M.T. (2022). Recent Progress on Emerging Applications of Hydrochar. *Energies*, 15(24), 9340. <https://doi.org/10.3390/en15249340>
- Jia, G.Y., Tang, X., & Xu, J. (2021). Synthesis of hydrochar supported zero-valent iron composites through hydrothermal carbonization of granatum and zero-valent iron: potential applications for Pb²⁺ removal. *Water Science and Technology*, 84(8), 1873-1884. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.366>
- Kahilu, G.M., Bada, S., & Mulopo, J. (2022). Coal Discards and Sewage Sludge Derived-Hydrochar for HIV Antiretroviral Pollutant Removal from Wastewater and Spent Adsorption Residue Evaluation for Sustainable Carbon Management. *Sustainability*, 14(22), 15113. <https://doi.org/10.3390/su142215113>
- Kang, S., Li, X., Fan, J., & Chang, J. (2012). Characterization of Hydrochars Produced by Hydrothermal Carbonization of Lignin, Cellulose, d-Xylose, and Wood Meal. *Ind Industrial & Engineering Chemistry Research*, 26(51), 9023 – 9031. <https://doi.org/10.1021/ie300565d>
- Karaeva, J.V., Timofeeva, S.S., Bashkirov, V.N., & Bulygina, K.S. (2023). Thermochemical processing of digestate from biogas plant for recycling dairy manure and biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 685-695. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01138-6>
- Katuwal, S., Rafsan, N.A.S., Ashworth, A.J., & Kolar, P. (2023). Poultry litter physiochemical characterization based on production conditions for circular systems. *Bioresources*, 18(2), 3961-3977. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.3961-3977>
- López, E., Jiménez, J., López, L.M., Barrera, E.L., Bravo, E., Contreras, L.M., & Romero, O. (2022). Biochemical methane potential of agro-wastes as a renewable source alternative for electrical energy production in Cuba. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(1), e1890. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:1890
- López, L.M., Ruiz, J.M., Contreras, L.M., Garciga, J.P., & Hermida, O. (2019). Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo. *Tecnología Química*, 39(2), 286-300. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000200286&lng=es&tlng=es
- Manogaran, M.D., Shamsuddin, R., Hizami, M., Yusoff, M., Lay, M., & Sival, A.A. (2022). A review on treatment processes of chicken manure. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100013>
-

- Masoumi, S., Borugadda, V.B., Nanda, S., & Dalai, A.K. (2021). Hydrochar: A Review on Its Production Technologies and Applications. *Catalysts*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/catal11080939>
- Mau, V., Arye, G., & Gross, A. (2018). Wetting properties of poultry litter and derived hydrochar. *PLOS ONE*, 13(10), e0206299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206299>
- ONEI. (2024). Anuario Estadístico de Cuba Edición 2023. <http://www.onei.gob.cu/>
- Peterson, A.A., Vogel, F., Lachance, R.P., Fröling, M., Antal, M.J., & Tester, J.W. (2008). Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. *Energy Environ Sci* (1), 32-65. <https://doi.org/10.1039/b810100k>
- Roslan, S.Z., Zainudin, S.F., Mohd Aris, A., Chin, K.B., Musa, M., Mohamad Daud, A.R. & Syed Hassan, S.S.A. (2023). Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge into Solid Biofuel: Influences of Process Conditions on the Energetic Properties of Hydrochar. *Energies*, 16(5), 2483. <http://doi.org/10.3390/en16052483>
- Santos, F., da Silva, J.N., Carneiro, A.C., Ferreira, I. de F., Christiam, R., de Oliveira, M., Teixeira, L.F., & Teixeira, S. (2017). Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 941-949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.104>
- Smith, A.M., & Ross, A.B. (2019). The Influence of Residence Time during Hydrothermal Carbonization of Miscanthus on Bio-Coal Combustion Chemistry. *Energies*, 12(3), 523. <https://doi.org/10.3390/en12030523>
- Viaene, J., Peiren, N., Vandamme, D., Lataf, A., Cuypers, A., Jozefczak, M., Amery, F., & Vandecasteele, B. (2023). Screening tests for N sorption allow to select and engineer biochars for N mitigation during biomass processing. *Waste Management*, 155, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.037>
- Wei, Y., Li, Z., Ran, W., Yuan, H., & Li, X. (2021). Performance and microbial community dynamics in anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover with different modification methods and trace element supplementation strategy. *Bioresource Technology*, 325, 124713. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124713>
- Zhang, X.P., Zhang, Ch., Li, X., Yu, Sh.H., Tan, P., Fang, Q.Y., & Chen, G. (2018). A two-step process for sewage sludge treatment: Hydrothermal treatment of sludge and catalytic hydrothermal gasification of its derived liquid. *Fuel Processing Technology* 180, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.012>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Wendy Lucia Duharte Rodríguez. Investigación, redacción - revisión y edición.
 - M.Sc. Leyanet Odales Bernal. Redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Ernesto Luis Barrera Cardoso. Gestión de proyectos, redacción - revisión y edición.
-