

Conversión termoquímica de residuos sólidos de naranja a través de pirólisis para la producción de biochar con diversas aplicaciones

Julia Renata Hernández-Roa ¹, Laura Mila Saavedra ², Romain Lemaire ³, Ofelia Landeta-Escamilla ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹ y 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

³ TFT Laboratory, Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, Montreal, Quebec H3C 1K3, Canada

* Autor de correspondencia: eriksamuerm@hotmail.com

Energías Renovables (Waste to Energy)

Recibido: 12 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 25 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.571>

Resumen: El procesamiento de naranja para la obtención de jugo fresco, jugo concentrado, aromas, aceites, entre otros, genera una gran cantidad de residuos sólidos, que representan una oportunidad para revalorizar dichos residuos por medio de tratamientos termoquímicos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue producir biochar a partir de residuos sólidos de naranja (RSN) por medio de pirólisis para evaluar sus propiedades y determinar su potencial en diversas aplicaciones. Se recolectaron RSN en el Mercado Municipal Emiliano Zapata, los cuales fueron acondicionados, mediante un proceso de secado para ser sometidos a un proceso de pirólisis lenta a 550 °C en un reactor escala laboratorio tipo Auger. La caracterización fisicoquímica de los RSN reveló un alto contenido de fracción orgánica representada como sólidos volátiles (94.00 ± 0.38 %), lo que la convierte en una biomasa adecuada para conversión termoquímica. El rendimiento del proceso de pirólisis fue de 30.31 % de biochar (fase sólida), 15.99 % de fase aceitosa y 16.37 % de fase acuosa, obteniendo además un 37.32 % de gases no condensables. La caracterización del biochar mostró propiedades fisicoquímicas favorables, como un pH alcalino (8.53), 96.9 % de materia seca y elevados contenidos de potasio y calcio y otros macronutrientes. Las propiedades del biochar obtenido indican que se trata de un material con gran potencial para aplicaciones diversas, tales como: mejorador de suelos, ayuda en la remoción de contaminantes, secuestrador de carbono o como aditivo en procesos biológicos como digestión anaerobia.

Palabras clave: residuos sólidos de naranja, procesos termoquímicos, pirólisis, biochar

Thermochemical conversion of orange solid waste through pyrolysis for the production of biochar for different applications

Abstract: The processing of oranges to obtain fresh juice, juice concentrate, aromas, oils, among others, generates a large amount of solid waste, which represents an opportunity to revalorize such waste by means of thermochemical treatments. Therefore, the objective of this work was to produce biochar from orange solid waste (OSW) by pyrolysis to evaluate its properties and determine its potential for different applications. OSW were collected from the Emiliano Zapata Municipal Market, conditioned and subjected to a slow pyrolysis process at 550 °C in an Auger-type laboratory scale reactor. The physicochemical characterization of the OSW showed a high content of organic fraction represented as volatile solids (94.00 ± 0.38 %), conforming its suitability for thermochemical conversion. The yield of the pyrolysis process was 30.31 % biochar (solid phase), 15.99 % oily phase and 16.37 % aqueous phase, obtaining in addition 37.32 % non-condensable gases. Characterization of the biochar showed favorable physicochemical properties, such as an alkaline pH (8.53), 96.9 % dry matter and high contents of potassium and calcium and other macronutrients. The properties of the biochar obtained indicate that it is a material with great potential for different applications, such as soil improver, removal of contaminants, carbon sequestrant or additive in the anaerobic digestion process.

Keywords: solid orange waste, thermochemical processes, pyrolysis, biochar

Introducción

Actualmente, la producción de naranja a nivel mundial alcanza aproximadamente 48.8 millones de toneladas, siendo México el cuarto productor de naranja del mundo detrás de Brasil, China y la Unión Europea (USDA, 2024). La naranja es el cítrico más predominante plantado en México y el estado de Veracruz posee casi la mitad del área total cosechada, contando con una producción de 2.2 millones de toneladas, lo que representa el 43 % de la producción total anual (SIAP, 2024). El residuo que se produce después de extraer el jugo de la naranja representa aproximadamente el 50 %

de la masa total de la fruta fresca y la composición de este residuo se divide de la siguiente manera, cáscara (60 a 65 %), pulpa (30 a 35 %) y semillas (0 a 10%) (de Lima *et al.*, 2022). Este residuo contiene altos niveles de azúcares, celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y otros compuestos que lo hacen adecuado para ser empleado como biomasa en diversos procesos de aprovechamiento (Yaradoddi *et al.*, 2022). La valorización de los residuos sólidos de naranja por métodos termoquímicos para obtener biochar no compite directamente con la obtención de otros productos como aceites esenciales, pectina, compuestos fenólicos (Sharma *et al.*, 2022), sino que; la pirólisis como método termoquímico es una alternativa para enriquecer la cadena de valor. Además, la conversión de residuos cítricos por medio de pirólisis en biochar puede ser no sólo económicamente competitivo, también contribuye al aprovechamiento de residuos procedentes de la agricultura (Jian *et al.*, 2020). La obtención de cáscara de naranja como biomasa permite obtener un recurso renovable que puede ser empleado en la producción de energía, ya que la biomasa se considera globalmente un tipo de energía libre de carbono debido a su ciclo en la vegetación. La biomasa se ha convertido en la cuarta energía utilizada después del carbón, el petróleo y el gas natural (Wang y Wu, 2023).

Por su parte, la conversión termoquímica de la cáscara de naranja es una opción rentable para convertir esta biomasa en productos con diferentes aplicaciones, utilizando métodos basados en el calor. Generalmente, este tipo de conversiones de biomasa consisten en tecnologías de combustión, licuefacción, torrefacción, pirólisis y gasificación (Joshi *et al.*, 2024). De esta manera, la pirólisis se caracteriza por ser un proceso de descomposición térmica de la biomasa a temperaturas de 400 a 800 °C sin la adición de oxígeno externo, teniendo como producto tres fracciones principales: biochar, bioaceite y gas de síntesis (Danso-Boateng *et al.*, 2022). El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un reactor tipo Auger, seleccionado por las ventajas que ofrece frente a otros equipos. Este tipo de reactor permite operar de manera continua y controlada, asegurando tiempos de residencia definidos y una buena distribución de la biomasa gracias a su tornillo sin fin. Además, presenta menos problemas de taponamiento en comparación con otros sistemas como los de lecho fijo. Estas características hacen que el reactor Auger sea una opción práctica y escalable para el tratamiento de residuos sólidos de naranja. (Le Roux *et al.*, 2022). El biochar, como producto principal de la pirólisis ha ganado interés por sus múltiples beneficios en el cuidado del ambiente, gracias a su estructura porosa y su estabilidad (Manga *et al.*, 2023). El biochar tiene diversas aplicaciones y puede utilizarse para mejorar suelos, filtrar contaminantes en el agua, capturar carbono e incluso ayudar en procesos biológicos como la digestión anaerobia, donde puede estabilizar el sistema y mejorar la producción de biogás (Webber y Quicker, 2018).

En años recientes, múltiples estudios han explorado el aprovechamiento de biochar obtenido a partir de diversas biomásas como aditivo para optimizar diversos procesos ambientales, por ejemplo; 1) Sugiarto *et al.* (2021), evaluaron el efecto del biochar producido a partir de aserrín de pino por pirólisis sobre la digestión anaerobia de residuos alimentarios. La adición de biochar incrementó la producción de metano en un 46.9 % y la tasa diaria en un 43.0 %. 2) Kabir *et al.* (2023), investigaron la influencia de la incorporación de biochar en las propiedades del suelo y su potencial para abordar problemas ambientales a través de la mejora de su composición. 3) López-Puga (2023), evaluó el poder calorífico de los biocombustibles sólidos obtenidos a través de dos procesos termoquímicos teniendo como biomasa mezclas de cítricos. 4) Jayawardhana *et al.* (2019) estudiaron el biochar como ayuda en la eliminación de contaminantes orgánicos, empleando biochar obtenido mediante pirólisis de residuos sólidos urbanos para la eliminación de bencenos alquilados, logrando capacidades de adsorción de 850 µg/g para tolueno y 550 µg/g para m-xileno. 5) Kane *et al.* (2020), estudiaron biochar derivado de lignina con alta conductividad eléctrica para ser usado como aditivo de electrodo conductor dentro de las baterías de iones de litio. En la actualidad, existe el reto de encontrar opciones viables que permitan utilizar el residuo sólido de naranja como fuente de biomasa para ser empleada en procesos termoquímicos para la obtención de biochar. Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue producir biochar a partir de residuos sólidos de naranja por medio de pirólisis para evaluar sus propiedades y determinar su potencial en aplicaciones sustentables.

Materiales y Métodos

Recolección de residuos sólidos de naranja (RSN)

Como materia prima se utilizaron RSN, se recolectaron 20 kg de los residuos que se generan en los establecimientos comerciales y de jugos del Mercado Municipal Emiliano Zapata. Los RSN se cortaron en trozos pequeños (2-3 cm) para facilitar su manejo y su posterior análisis. Usualmente, los RSN están compuestos mayoritariamente por agua,

carbohidratos estructurales, además de aceites esenciales (principalmente D-limoneno), compuestos fenólicos, y pequeñas cantidades de proteínas y minerales (de Lima et al., 2022).

Caracterización de los residuos sólidos de naranja

Se realizó una caracterización fisicoquímica de los RSN mediante las siguientes determinaciones analíticas: Para la medición de potencial de hidrógeno (pH), se preparó una suspensión de 10 g de RSN y 20 mL de agua destilada, manteniéndose en agitación durante 30 min. Después de esto se dejó reposar durante 15 minutos. Posterior a esto, se realizó la lectura del pH con Potenciómetro OAKTON por triplicado. La humedad se determinó mediante el método gravimétrico, secando la muestra a 110 °C en un crisol previamente a peso constante, durante 24 h en una estufa de secado marca Riossa hasta obtener peso constante. La cantidad de sólidos totales (ST) se midió como la fracción no evaporada después del secado de la muestra a 105 °C durante 24 h, utilizando crisoles previamente sometidos a peso constante. La determinación de cenizas se realizó a partir de la muestra seca, por medio de calcinación a 550 °C durante dos horas en una mufla marca Barnstead Thermolyne 1300 Furnace, obteniendo el contenido de cenizas en base seca. Los sólidos volátiles (SV) fueron cuantificados a partir de la muestra obtenida en la determinación de ST, mediante la diferencia de pesos entre los ST y el residuo después de la calcinación.

Acondicionamiento de los residuos sólidos de naranja

Debido al alto contenido de humedad de los RSN (79.93 %), fue necesario someterlos a un proceso de secado previo al proceso de pirólisis. Los RSN se secaron al sol durante 72 horas, permitiendo reducir la humedad sin el uso de energía eléctrica. Para la caracterización de los RSN secos, se realizaron las mismas determinaciones analíticas mencionadas en la caracterización de RSN antes del secado. Después del secado, los RSN se trituraron y tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula entre 1.0 y 3.8 mm antes de ser sometidos al proceso de pirólisis.

Proceso de pirólisis de los residuos sólidos de naranja

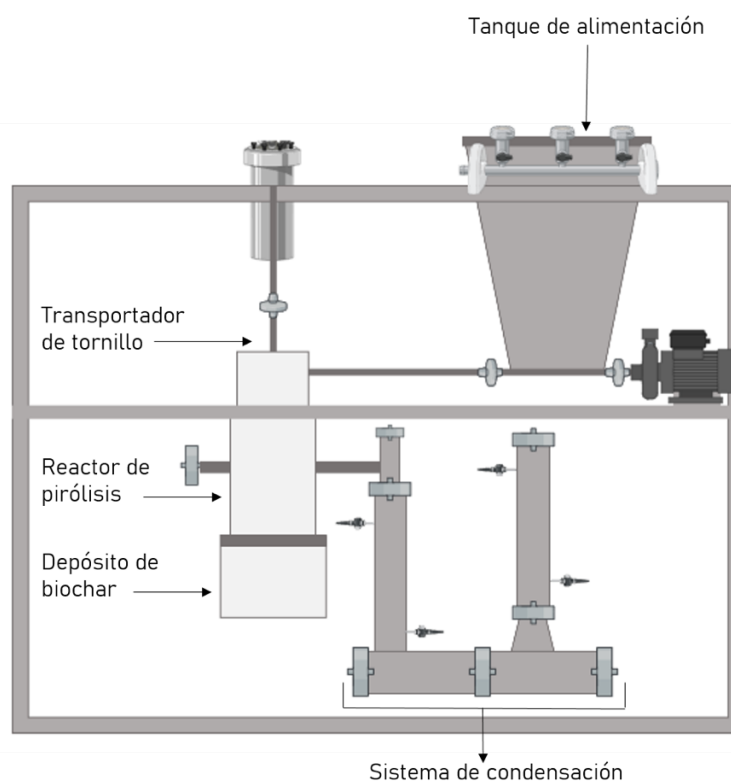


Figura 1. Reactor de pirólisis tipo AUGER para la conversión termoquímica de RSN

Después del acondicionamiento de los RSN, la pirólisis se llevó a cabo en un reactor de escala laboratorio, de tipo Auger diseñado y patentado por el Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), Québec,

Canadá, como se presenta en la Figura 1. Las condiciones bajo las cuales se operó dicho reactor fueron: Temperatura de 550 ° C, tiempo de residencia de 104 s y caudal de nitrógeno 3 L/min. Los RSN se ingresaron al reactor de pirólisis mediante dos transportadores de tornillo sin fin. La descomposición térmica ocurrió en ausencia de oxígeno dentro del reactor, generando biochar como el residuo sólido, el cual fue recolectado en un tanque. Los vapores resultantes se enviaron a un sistema de condensación para recuperar el bioaceite, mientras que, los gases no condensables fueron liberados a la atmósfera.

Para evaluar la pirólisis, en términos de rendimiento de los tres productos obtenidos, se calculó el porcentaje de cada fase mediante la relación entre la masa del producto obtenido y la masa de biomasa introducida al reactor de pirólisis.

Caracterización general, composición elemental, macro y micronutrientes del biochar

El biochar producido fue caracterizado a través de las siguientes determinaciones analíticas:

- Propiedades generales: pH, materia seca, contenido de cenizas, materia orgánica (MO), y carbono orgánico (CO).
- Composición elemental: Carbono total (CT) y nitrógeno total (mediante analizador elemental tipo LECO), así como nitrógeno total Kjeldahl (digestión con solución H₂SO₄ y detección colorimétrica).
- Contenido de macro y micronutrientes: P, K, Ca, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, Ba, Sr, S determinados después de la digestión ácida de acuerdo con el método EPA 3050B y análisis por espectrometría de plasma acoplado inductivamente.

Resultados y Discusión

Caracterización de residuos sólidos de naranja antes y después del secado

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los RSN antes y después del secado disponibles para la pirólisis se presentan en la Tabla 1. En total se secaron alrededor de 20 kg de RSN, de los cuales se obtuvieron 4.8 kg de RSN secos.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de materia prima húmeda y seca para ser sometida a pirólisis.

Determinación	RSN húmedos	RSN secos
pH	3.91 ± 0.02	3.48 ± 0.01
Humedad (%)	79.93 ± 0.57	11.80 ± 9.57
Cenizas (%)	4.78 ± 0.46	6.00 ± 0.38
ST (%)	20.07 ± 0.57	88.20 ± 9.57
SV (%)	95.22 ± 0.46	94.00 ± 0.38

Las determinaciones fueron realizadas por triplicado.

Los RSN presentaron un alto contenido de humedad en su estado fresco (79.93 %), posterior al secado se puede notar una reducción significativa con un valor de 11.80 % lo que resalta la importancia del secado previo para la aplicación de la pirólisis. En cuanto a los ST, en estado húmedo se obtuvo un valor de 20.07 %, mientras que en estado seco alcanzaron 88.20 %, lo cual evidenció la eficiencia del secado al reducir el contenido de agua. Por otro lado, el contenido de SV fue alto en ambas muestras (húmeda y seca), con valores de 95.22 % y 94.00 %, respectivamente. Esta diferencia no fue significativa, lo que indica que un alto contenido de materia orgánica presente.

Los RSN secos presentaron un pH ligeramente ácido (3.48), superior al reportado por López-Puga (2023) para mezcla de cítricos (2.85). En términos de contenido de cenizas (6.00 %), los RSN secos mostraron un valor considerablemente menor que otros residuos como los de piña (18.8 % según Vamvuka *et al.*, 2023). Además, los ST (88.20 %) y los SV (94.00 %) indicaron una alta proporción de materia orgánica disponible, superando a la mezcla de cítricos de López-Puga (2023) (70.87 % ST) y a la cascarilla de arroz reportada por Zou *et al.* (2024) (62.7 % SV).

Proceso termoquímico de pirólisis

En la Tabla 2 se presentan los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de RSN y sus respectivos rendimientos. La biomasa inicial utilizada tuvo un peso total de 2,900 g. Como productos de dicho proceso se obtuvieron tres fracciones principales: 1) Biochar, 2) Fase aceitosa y 3) Fase acuosa como se aprecia en la Figura 2. El biochar representó la mayor fracción sólida con un rendimiento del 30.31 %, seguido de la fase aceitosa (15.99 %) y la fase acuosa (16.37 %). La suma de estas tres fracciones representa el 62.68 % del total de la biomasa tratada, mientras que el 37.32 % restante corresponde a productos gaseosos no condensables.

Tabla 2. Productos obtenidos del proceso de pirólisis y rendimiento de cada fase

Producto	Peso (g)	Rendimiento (%)
Biomasa inicial	2,900	
Fase sólida (biochar)	879.1	30.31
Fase aceitosa	463.7	15.99
Fase acuosa	474.8	16.37
Suma de las tres fases anteriores		62.68
Productos gaseosos no condensables		37.32



Figura 2. Fases obtenidas a partir de la pirólisis a) Fase sólida (biochar) y b) Fases aceitosa y acuosa

Los resultados obtenidos en la pirólisis de los RSN, se alinean con las tendencias observadas en la literatura para biomasa lignocelulósicas. Por ejemplo, estudios como Ko *et al.* (2024), quienes analizaron la pirólisis de residuos lignocelulósicos a 550 °C y reportaron un rendimiento de biochar cercano al 28%, así como una fracción líquida dividida en una fase aceitosa (16.66 - 20.24%) y una fase acuosa (17.16 - 22.68%). En comparación con otros materiales como residuos de madera o cáscara de coco analizados por Babu *et al.* (2023), quienes generaron a 600 °C entre 22.61 % y 30.80 % de biochar respectivamente, mostrando así que los RSN se ubican en un rango intermedio.

Caracterización de biochar

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización realizada al biochar obtenido. El biochar obtenido a partir de RSN presentó un pH de 8.53, lo que indica una alcalinidad moderada, este valor es similar al reportado por Chávez-Garcías *et al.* (2019) (8.51), pero menor al de otros estudios como Devens *et al.* (2018) (9.78) o López-Puga. (2023) (11.2). La materia seca (96.9 %) y la materia orgánica (79.6 %) sugieren una adecuada estabilidad estructural del material carbonoso.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del biochar

pH	Cenizas (%)	Materia seca (%)	MO (%)	CO (%)	CT (%)
8.53	20.4	96.9	79.6	46.2	60.0

Los resultados obtenidos del análisis de macronutrientes y minerales realizado al biochar se presentan en las Tablas 4 y 5, respectivamente. En cuanto a su composición mineral, el biochar presentó contenidos elevados de potasio (29,697 mg/kg) y calcio (38,822 mg/kg), similares a los de López-Puga. (2023) (K = 32,414 mg/kg, Ca = 31,249 mg/kg) y superiores a los de Jiang *et al.* (2019) (K = 15,100 mg/kg, Ca = 25,800 mg/kg). También se detectaron cantidades menores de magnesio (2,861 mg/kg), el cual es comparable al de Jiang *et al.* (2019) (2,500 mg/kg) y López-Puga (2023) (3,746 mg/kg). Entre los micronutrientes, destacan valores de boro (67.4 mg/kg), zinc (27.5 mg/kg), manganeso (23.8 mg/kg), hierro (115 mg/kg) y cobre (9.70 mg/kg). Estas concentraciones son similares a las encontradas por Chávez-García *et al.* (2019) y López-Puga (2023), aunque Feitosa *et al.* (2020) reportaron valores mucho mayores como hierro (585 mg/kg) y cobre (370 mg/kg). El contenido de metales pesados como cadmio, plomo y cobalto no fueron detectables, lo que indica un nulo riesgo toxicológico para aplicaciones ambientales.

Tabla 4. Macronutrientes del biochar de RSN

N Total (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
2.13	2,729	29,697	38,822	2,861

Tabla 5. Composición mineral del biochar de RSN

Na (mg/kg)	Al (mg/kg)	B (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)
309	17.6	67.4	9.70	115
Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)
23.8	27.5	0.50	4.78	0
Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ba (mg/kg)	S (mg/kg)
1.82	0	0	142	632

Con base en los resultados obtenidos a partir de la caracterización del biochar, se observó que el biochar es apto para ser aplicado como mejorador del proceso de digestión anaerobia. Esto es, debido a que presenta un pH ligeramente alcalino, esto brindará estabilidad al proceso amortiguando el efecto de los ácidos grasos volátiles (AGVs) producidos durante la digestión anaerobia. También, se observó que existe presencia de macro y micro nutrientes que favorecen el metabolismo de las comunidades microbianas durante la digestión anaerobia. Además, la ausencia notable de metales pesados, asegura que las comunidades microbianas no correrán riesgo su metabolismo por presencia de materiales tóxicos. Todo esto pone de manifiesto que el biochar producido a partir de residuos sólidos de naranja, posee un potencial como mejorador del proceso de digestión anaerobia.

Conclusiones

Los residuos sólidos de naranja demostraron ser una biomasa adecuada para procesos termoquímicos debido a su alto contenido de sólidos volátiles y materia orgánica. Después del proceso de pirólisis, se logró obtener un biochar con rendimiento de 30.31 % y se alcanzaron a recuperar subproductos líquidos como la fase líquida y la fase aceitosa. El biochar obtenido a partir de residuos sólidos de naranja mostraron una composición rica en nutrientes esenciales y un pH alcalino que lo hacen potencialmente útil en aplicaciones ambientales. En procesos biológicos, como la digestión anaerobia, puede contribuir en la estabilidad del proceso, ayuda como soporte microbiano y aportar nutrientes para las poblaciones microbianas. Como mejorador de suelos, la alcalinidad del biochar puede ser útil para remediar suelos ácidos y aportar nutrientes principalmente en suelos con deficiencias minerales en sistemas agrícolas. Finalmente, la ausencia de metales pesados (Cd, Pb, Co) garantiza un uso seguro para sistemas ambientales.

Agradecimientos y financiamiento: Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para la realización de esta investigación. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca nacional con número de registro 4019882. Al programa Líderes Emergentes en las Américas (ELAP) de Global Affairs Canada por la asignación de la beca con número 001273805. Al equipo de ingeniería agroambiental del Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) por el apoyo brindado durante la estancia.

Bibliografía

- Chávez-García, E., Aguillón-Martínez, J., Sánchez-González, A., & Siebe, C. (2020). Characterization of untreated and composted biochar derived from orange and pineapple peels. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 413–427. <https://doi.org/10.20937/RICA.53591>
- Danso-Boateng, 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>
- de Lima, L. F., Monteiro, V. C., Barquilha, C. R., & Braga, M. B. (2022). Production of biochars derived from sewage sludge and orange peels. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.5902/2236117062692>
- Feitosa, A., Teixeira, W., Ritter, E., Resende, F., & Kern, J. (2020). Characterization of biochar samples of banana peels and orange bagasse carbonized at 400 and 600 °C. *Revista Virtual de Química*, 12(4), 901–912. <http://rvq.sbg.org.br>
- Jayawardhana, Y., Gunatilake, S. R., Mahatantila, K., Ginige, M. P., & Vithanage, M. (2019). Sorptive removal of toluene and m-xylene by municipal solid waste biochar: Simultaneous municipal solid waste management and remediation of volatile organic compounds. *Journal of Environmental Management*, 238, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.097>
- Jiang, Q., Chen, Y., Yu, S., Zhu, R., Zhong, C., Zou, H., Li, G., & He, Q. (2020). Effects of citrus peel biochar on anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge and its direct interspecies electron transfer pathway study. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125643. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125643>
- Joshi, N. C., Sinha, S., Bhatnagar, P., Nath, Y., Negi, B., Kumar, V., & Gururani, P. (2024). A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. *Current Research in Microbial Sciences*, 6, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100237>
- Kane, S., Storer, A., Xu, W., Ryan, C., & Stadie, N. (2022). Biochar as a renewable substitute for carbon black in lithium-ion battery electrodes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(37), 12226–12233. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02974>
- Le Roux, É., Barnabé, S., Godbout, S., Zamboni, I., & Palacios, J. (2022). Production and characterization of two fractions of pyrolysis liquid from agricultural and wood residues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(8), 3333–3343. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01015-2>
- López-Puga, A. (2023). *Conversión de residuos cítricos mediante procesos termoquímicos para la producción de biocombustibles* (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Orizaba, México.
- Manga, M., Aragón-Briceño, C., Boutikos, P., Semiyaga, S., Olabinjo, O., & Muoghalu, C. (2023). Biochar and its potential application for the improvement of the anaerobic digestion process: A critical review. *Energies*, 16(10), 4051. <https://doi.org/10.3390/en16104051>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Escenario mensual de productos agroalimentarios: Naranja*. Dirección de Análisis Estratégico. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938469/Naranja_Julio.pdf
- Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Kumar, V., Farooqui, A., Varjani, S., & Younis, K. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351, 127064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064>
- Sugiarto, Y., Sunyoto, S. N., Zhu, M., Jones, I., & Zhang, D. (2021). Effect of biochar addition on microbial community and methane production during anaerobic digestion of food wastes: The role of minerals in biochar. *Bioresource Technology*, 323, 124585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124585>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2024). *Citrus annual: Mexico* (GAIN Report No. MX2024-0063). Foreign Agricultural Service. Recuperado de https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Citrus%20Annual_Monterrey%20ATO_Mexico_MX2024-0063.pdf
- Wang, Y., & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Yaradoddi, J., Banapurmath, N., Ganachari, S., Soudagar, M. E., Sajjan, A., Kamat, S., & Ali, M. A. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3186–3197. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.016>