

Biomasa Residual Olivícola: Valorización y Remediación en Matrices Acuosas

Olive-growing waste biomass: Valorization and remediation of aqueous matrices

Doctoranda

Guenny QUIZHPE

<https://orcid.org/0009-0009-1657-0386>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina. Centro de investigación y Tecnología Química, Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRC, Córdoba, Argentina.

e-mail: gquizhpe@frc.utn.edu.ar / guennybri567@gmail.com

Directora:

Angélica HEREDIA

Codirectoras:

Dolores ALVARÉZ / María GAYOL

Resumen

El objetivo del trabajo de investigación es desarrollar estrategias de valorización integral de la biomasa residual de la industria olivícola mediante la obtención de biomateriales funcionales y vectores energéticos. Estos productos serán evaluados en la remediación de aguas contaminadas y en el marco de la producción de energía sostenible, bajo un enfoque de economía circular, para generar respuestas a problemáticas socioeconómicas regionales. Se llevó a cabo la recolección de muestras de carozo de aceituna proveniente de una empresa olivícola. Se diseñó y construyó un sistema de pirólisis a escala de laboratorio bajo atmósfera inerte de N₂, con recuperación de biolíquidos a -20°C. Los ensayos preliminares validaron el adecuado funcionamiento del sistema de pirólisis puesto en marcha. El biocarbon obtenido se caracteriza mediante FTIR, DRX, BET, SEM-EDX Y TPD, evaluándose su capacidad de remoción de arsénico, boratos, nitratos y polifenoles presentes en matrices acuosas. El presente trabajo se encuentra en su etapa inicial de desarrollo.

Palabras clave: valorización de biomasa; carozo de aceituna; pirólisis; biocarbón; adsorción.

Abstract

The objective of this research project is to develop strategies for the comprehensive utilization of residual biomass from the olive industry by producing functional biomaterials and energy vectors. These products will be evaluated for use in the remediation of contaminated water and in the context of sustainable energy production, within a circular economy framework, to address regional socioeconomic challenges. Samples of olive pits were collected from an olive-processing industry. A laboratory-scale pyrolysis system was designed and built under an inert N₂ atmosphere, with recovery of bioliquids at -20°C. Preliminary tests confirmed the proper functioning of the pyrolysis system once it was commissioned. The resulting biocarbon is characterized using FTIR, XRD, BET, SEM-EDX, and TPD, and its capacity to remove arsenic, borates, nitrates, and polyphenols from aqueous matrices was evaluated. This study is currently in its initial stage of development.

Keywords: valorization of biomass; olive pits; pyrolysis; biochar; adsorption.

Introducción

A nivel mundial, la producción de aceitunas alcanza los 21 millones de toneladas por año, de las cuales un 30% consiste en residuos sólidos como pulpa y huesos. Estos residuos poseen niveles de carbono total y carbono fijo, de alrededor 47% y 16%, respectivamente, que lo convierte en materia prima idónea para su aprovechamiento en productos de alto valor añadido (Fadhil & Kareem, 2021).

El proceso de obtención de aceitunas de mesa, consta de tres etapas fundamentales; un tratamiento alcalino, con hidróxido de sodio (denominado cocido), cuyo objetivo es eliminar la oleuropeína, responsable del amargor del fruto. Tras el tratamiento alcalino, las aceitunas se lavan con agua para eliminar los restos de hidróxido de sodio (lavado). Finalmente, se colocan en salmuera donde ocurre el proceso de fermentación (Santos et al., 2024).

La industria olivícola genera un impacto ambiental crítico debido a la producción anual de aproximadamente 7 millones de m³ de aguas residuales contaminantes provenientes del lavado y cocido. Dichos efluentes tradicionalmente se almacenan en balsas de evaporación. Los mismos se caracterizan por una carga orgánica con valores promedio de COD (*chemical oxygen demand*) de 18,8 g O₂·L⁻¹ y un pH alcalino entre 10 y 12 en aguas de cocido y lavado o de salmueras ácida con un COD hasta 32,3 g O₂·L⁻¹ en procesos de aceitunas sin tratar (Papadaki & Mantzouridou, 2024). Debido a que estos grandes volúmenes se generan en periodos cortos de tiempo y provienen de pequeñas industrias, representan un desafío de gestión que requiere de soluciones concretas. En este contexto, el aprovechamiento de remanentes industriales generados ha adquirido gran importancia ambiental (Fadhil & Kareem, 2021). En este contexto, la pirólisis se consolida como una técnica eficiente para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos (Bourafa et al., 2026). Los productos principales de la pirólisis, biocarbón, biolíquido y biogas tienen aplicaciones específicas y además, como vectores energéticos (Romero Millán L et al., 2016).

De esta manera, diversos estudios han demostrado la eficacia del biocarbón obtenido a partir de la pirólisis del carozo de aceituna como material adsorbente para la remoción de contaminantes en matrices acuosas. Li et al., (2023), obtuvieron una capacidad máxima de adsorción de nitrato de 35,59 mg·g⁻¹ con un biocarbón generado con energía solar, significativamente más alta que con los carbones activados disponibles comercialmente. Asimismo, Abid et al., (2022) obtuvieron una capacidad de adsorción de polifenoles provenientes de efluentes de aceitunas de 40,47 mg·g⁻¹ a 30 °C. También informaron la recuperación de hidroxitirosol mediante adsorción con biocarbón producido por pirólisis de residuos sólidos derivados de la elaboración de aceite de oliva.

En este contexto, trabajar con muestras reales obtenidas de una empresa elaboradora de aceitunas de mesa representativa, permite evaluar el desempeño del material adsorbente bajo condiciones reales del efluente industrial, incluyendo efectos de la matriz acuosa, competencia entre especies contaminantes y variabilidad estacional según cosecha y variedad.

Desde el punto de vista científico tecnológico, el trabajo de investigación aporta conocimientos tanto sobre la relación entre las condiciones de pirólisis aplicada a una industria elaboradora de aceitunas representativa nacional, como sobre las propiedades físico-químicas y estructurales del biocarbón derivado y su capacidad de adsorción de contaminantes. A su vez, propone una solución en el marco de la economía circular para un problema ambiental propio del sector.

Así, en el presente trabajo se propone como objetivo general desarrollar estrategias de valorización integral de la biomasa residual de la industria olivícola mediante la obtención de biomateriales funcionales y vectores energéticos. Estos productos serán evaluados en la remediación de aguas contaminadas y en el marco de la producción de energía sostenible, bajo un enfoque de economía circular, para generar respuestas a problemáticas socioeconómicas regionales.

Desarrollo

Diseño Experimental

Las muestras recolectadas fueron sometidas a un proceso de secado en a 105 °C durante 6 h, para reducir la humedad. Una vez finalizado el secado, el material fue dividido en dos fracciones: carozo con pulpa residual (más rica en compuestos orgánicos) y carozo sin pulpa (predominantemente lignocelulósico). Esto permitió establecer dos condiciones de partida diferenciadas para evaluar en la pirólisis y el impacto real de la pulpa sobre las propiedades del biocarbon.

La conversión termoquímica de la biomasa se lleva a cabo en un reactor tubular de cuarzo, alojado en un horno de temperatura controlada, bajo atmósfera inerte mediante flujo regulado de N_2 . La descomposición térmica del material en ausencia de oxígeno permite obtener tres fracciones de producto: biocarbón (fase sólida), biolíquido (fase condensable) y biogás (fase no condensable). Los biolíquidos son recolectados en una trampa de condensación a $-20^\circ C$, con la finalidad de minimizar las reacciones secundarias y preservar la composición de los compuestos condensables. Asimismo, se encuentra en etapa de definición la selección de las condiciones operativas del proceso, incluyendo la temperatura final de pirólisis, la velocidad de calentamiento (rampa térmica) y el tiempo de residencia, variables que serán establecidas en función de la literatura especializada y de ensayos preliminares. En la Figura 1 se observa un esquema representativo de la pirólisis y las posibles aplicaciones de los productos obtenidos como la aplicación de la fase condensada para obtener productos de química fina y de la fase gaseosa para obtener syngas.

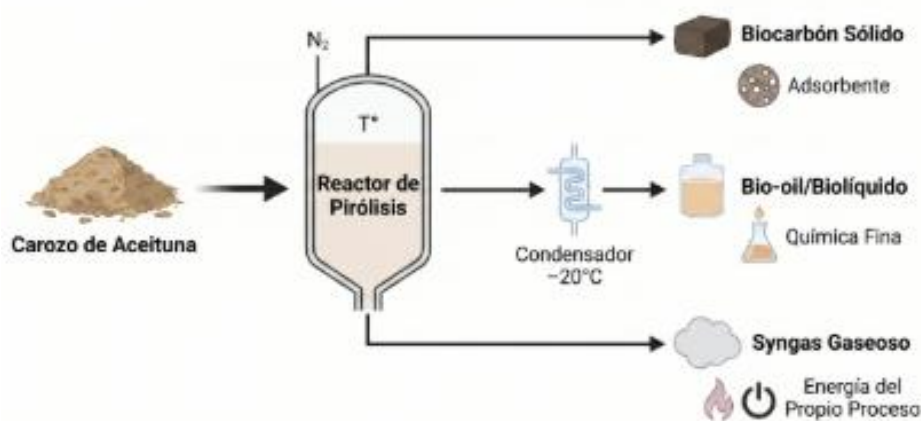


Figura 1: Esquema del sistema de pirólisis.

En primera instancia, el residuo sólido se activa con ácido o base (ácido fosfórico, hidróxido de potasio, etc.), para aumentar el área superficial, modificando la relación sólido/(ácido o base), tiempo, temperatura y agitación. En el post-tratamiento se impregnan por vía húmeda cationes metálicos (K^+ , Na^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , etc.) para conferir características redox o ácido-básicas, según el adsorbato a tratar o remediar. Se modifican las concentraciones del metal, tiempo de contacto, velocidad de agitación, pH, temperatura y fuente del metal (cloruro, sulfato, nitrato, etc.).

Los biocarbones obtenidos se caracterizan mediante distintas técnicas instrumentales orientadas a determinar sus propiedades ácido-base, texturales y su composición estructural: difracción de rayos x (DRX), área superficial específica mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET), microscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), etc. La acidez superficial se evalúa mediante desorción a temperatura programada de NH_3 , mientras que la basicidad se determina por TPD (*temperatura-programmed desorption*) de CO_2 . Adicionalmente, se emplea FTIR con adsorción de piridina y de CO_2 como moléculas sonda, para la identificación de sitios ácidos y básicos, respectivamente. La composición química del biolíquido y del biogás se determina mediante cromatografía gaseosa. La identificación de los compuestos presentes se realiza por comparación espectral con la biblioteca del *National Institute of Standards and Technology*.

Sobre los biocarbones obtenidos se realizan cuatro evaluaciones de remoción orientadas a determinar su capacidad adsorbente frente a distintos contaminantes de matrices acuosas: arsénico, boratos, nitratos y polifenoles en efluentes de aceituna de mesa. Se seleccionará el biocarbón de mayor actividad adsorbente para el estudio detallado de la interacción adsorbato-adsorbente, con el objetivo de inferir los posibles mecanismos de adsorción involucrados. Para ello, los datos experimentales serán ajustados con modelos matemáticos que permitan determinar los parámetros cinéticos, termodinámicos y de equilibrio del proceso. Asimismo, se evaluará la capacidad energética de los bioproductos obtenidos mediante la determinación del poder calorífico, el punto de inflamación, el contenido de agua y el índice de acidez, entre otros parámetros.

Campaña de muestreo

En una primera instancia, se llevó a cabo el muestreo de biomasa olivícola (carozo y pulpa) y de efluentes provenientes de los procesos de cocido y lavado de aceituna. La toma de muestras se realizó en la planta elaboradora de aceitunas de mesa "Cuenca del Sol" S.A., ubicada en la ciudad de Cruz del Eje, provincia de Córdoba, Argentina.

En la Figura 2 se observa el almacenamiento industrial de carozo de aceituna, estos pertenecen a aceitunas verdes de la variedad Manzanilla de la cosecha 2025, Mendoza. La toma de muestras de efluentes se observa en la Figura 3, estas corresponden a la etapa del cocido de la aceituna, recolectada 9.30 h y la siguiente del lavado a las 15.00 h. El rango horario indicado se debe a que a la necesidad de cumplimentar la extracción del 66% de la oleuropeína presente en la pulpa y responsable del amargor del fruto. Cabe destacar que las muestras de efluentes corresponden a aceituna verde de la variedad Arauco, cosecha 2026, también de la ciudad de Mendoza.



Figura 2: Almacenamiento industrial de carozos de aceituna.



Figura 3: Recolección de efluente de lavado.

Asimismo, se recolectaron muestras de la salmuera de fermentación de aceituna. De igual modo, se tomó muestra del efluente acumulado en la balsa de evaporación, donde convergen los efluentes generados en el proceso productivo. Cabe destacar que el procedimiento de toma de muestras se llevó a cabo mediante el Decreto N°847/16 de la Provincia de Córdoba.

Resultados

Se llevó a cabo la campaña de muestreo en la Empresa Olivícola con el objetivo de recolectar el carozo de aceituna que será empleado como materia prima en la etapa experimental de la investigación. Durante el muestreo se obtuvieron muestras representativas de carozo con una mínima cantidad de pulpa adherida, procurando mantener la representatividad del residuo generado durante el procesamiento industrial. La visita técnica realizada a la Empresa Olivícola resultó de gran importancia para el desarrollo del trabajo de investigación, ya que permitió comprender el proceso industrial de aceitunas de mesa, desde la recepción de la materia prima hasta el envasado del producto final. También se identificaron los puntos de generación de efluentes y residuos dentro de la planta, tales como los del cocido y lavado y carozos del proceso de descarozado, asegurando que las muestras recolectadas reflejen las condiciones reales de la industria olivícola. Esto permite ajustar el diseño experimental del proyecto en función de las características observadas in situ, tales como la variedad de aceituna, el tratamiento previo del carozo, tiempos y condiciones de recolección, optimizando los ensayos de pirólisis y caracterización a desarrollar. Y, a su vez, establecer contacto con personal de la empresa, generando un vínculo institucional que permite proyectar futuras campañas de muestreo y un intercambio continuo de información entre el ámbito académico y el sector productivo.

También se diseñó y construyó el sistema de pirólisis a escala de laboratorio para la producción de biocarbón a partir de biomasa residual olivícola, Figura 4. El sistema está constituido por un horno eléctrico que alberga el reactor donde se coloca la biomasa, operando bajo una atmósfera inerte de nitrógeno con el fin de evitar reacciones de combustión durante la descomposición térmica del material. El flujo de nitrógeno de alimentación es regulado mediante una válvula de control y cuantificado utilizando un rotámetro instalado antes de la entrada al reactor, garantizando el mantenimiento de condiciones

inertes durante todo el proceso. Como resultado de los ensayos preliminares realizados, se constató la obtención de un 34,5% de carbón activado a partir de la biomasa inicial. Este resultado es acorde a la información bibliográfica actualmente publicada.



Figura 4: Sistema de pirólisis.

Conclusiones

La visita técnica realizada a la Empresa Olivícola Cuenca del Sol S.A. permitió cumplir con el objetivo de recolección de muestras; carozos de aceituna y efluentes del proceso. A su vez, se adquirió experiencia en cuanto a la puesta en práctica de las normativas requeridas para la recolección de muestras de distintas características y de seguridad para el trabajo en industrias alimentarias. Esta etapa es fundamental para el desarrollo del trabajo de investigación, ya que permite obtener materia prima representativa (carozo de la aceituna y efluentes) directamente desde la fuente de su generación, junto con la información de las condiciones de operación (variedad, año de cosecha, etapa de la recolección). Asimismo, la trazabilidad resulta importante para sustentar la caracterización físico-química del biocarbón proveniente del carozo de aceituna, en el marco de valorización de biomasa residual olivícola.

Por otro lado, en cuanto al proceso de pirólisis, con el objetivo de minimizar las pérdidas de los productos generados, se realizó un control riguroso del funcionamiento del sistema, asegurando el correcto sellado del sistema y estabilidad de las condiciones operativas (temperatura, tiempo de residencia, rampa de calentamiento y flujo de gas inerte). Los ensayos preliminares validaron el adecuado funcionamiento del sistema de pirólisis puesto en marcha.

Como trabajo a futuro y mediante un convenio de colaboración con la Planta Piloto del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICTA), perteneciente a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), se prevé el empleo de un molino de bolas y otro de martillos para la reducción del tamaño de partícula del material lignocelulósico. Este pretratamiento físico adicional permitirá obtener muestras de trabajo de dimensiones preestablecidas y homogéneas, lo que favorecerá la uniforme transferencia de calor durante los ensayos y mejorará su reproducibilidad.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta BioRender: Scientific Figure and Illustration Software, para la creación de la figura 1 con el fin de mejorar la comunicación visual de los conceptos abordados. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

- Abid, N., Masmoudi, M. A., Megdiche, M., Barakat, A., Ellouze, M., Chamkha, M., Ksibi, M., & Sayadi, S. (2022). Biochar from olive mill solid waste as an eco-friendly adsorbent for the removal of polyphenols from olive mill wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 384–398. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.02.029>
- Bourafa, A., Belhachemi, M., Kilani, E. B., Jellali, S., & Jeguirim, M. (2026). Porous Activated Carbons from Olive Stone-Derived Biochar and Hydrochar: Production, Characterization and Application for Amoxicillin Removal. *Processes*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/pr14071064>
- Fadhil, A. B., & Kareem, B. A. (2021). Co-pyrolysis of mixed date pits and olive stones: Identification of bio-oil and the production of activated carbon from bio-char. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105249>
- Li, S., Galoustian, T., & Trejo, H. (2023). Biochar pyrolyzed with concentrated solar radiation for enhanced nitrate adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106131>
- Papadaki, E., & Mantzouridou, F. T. (2024). Application of *Aspergillus niger* for Extracellular Tannase and Gallic Acid Production in Non-sterile Table Olive Processing Wastewaters. *Waste and Biomass Valorization*, 15(2), 1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02242-0>
- Romero Millán L, Cruz Domínguez M, & Sierra Vargas F. (2016). Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. *Tecnura*. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>
- SANTOS, K. D., ÁLVAREZ, D. M. E., CRIVELLO, M. E., MENDIETA, S. N., & LABUCKAS, D. O. (2024). Materiales Fotocatalíticos-Adsorbentes para el Tratamiento de Efluentes de Aceitunas Verdes. *AJEA*, (AJEA 37). <https://doi.org/10.33414/ajea.1708.2024>