

Desarrollo y aplicación de biochar funcionalizado para producción sostenible de biodisel y adsorción de CO₂ y moléculas orgánicas

Development and application of functionalized biochar for sustainable biodiesel production and adsorption of CO₂ and organic molecules

Doctoranda:

Paola Guadalupe CHIAPPERO

<https://orcid.org/0009-0008-2720-9804>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina

chiappero.pao@gmail.com

Directora:

Verónica Viviana NICOLAU

Codirectora:

María Laura Martínéz

Resumen

En el marco de una tesis doctoral orientada al diseño de biochar funcionalizado a partir de ligninas industriales para la producción sostenible de biodiésel y la adsorción de CO₂ y moléculas orgánicas, se presentan los resultados preliminares de dos líneas de trabajo complementarias. En NANOTEC (UTN Facultad Regional Córdoba) se optimizó la síntesis de biochar por pirólisis lenta de lignina Kraft asistida con KOH, evaluando relaciones activador/precursor entre 2,5 y 15 g de KOH cada 5 g de lignina y temperaturas de carbonización entre 450 y 600 °C. Las formulaciones con 10 g (Solución A) y 15 g de KOH (Solución B) cada 5 g de lignina, a 500 y 550 °C, mostraron el mejor desempeño: la Solución A presentó mayor rendimiento neto de lavado (50,9-58,7 %), mientras que la Solución B alcanzó las mayores áreas superficiales BET (hasta 617 m²/g) y volúmenes de poro (hasta 0,42 cm³/g). En paralelo, en GPOL (UTN Facultad Regional San Francisco) se pusieron a punto técnicas de titulación conductimétrica y potenciométrica para cuantificar grupos ácidos superficiales de lignina Kraft (Suzano) y lignosulfonato (LignoTech), obteniéndose contenidos de grupos ácidos totales de 6,7 y 6,1 mmol/g, respectivamente, y dos zonas de neutralización bien diferenciadas en la titulación potenciométrica de la lignina Kraft. Estos resultados constituyen la base experimental para las etapas de activación, funcionalización y evaluación de los biochar obtenidos.

Palabras clave: Biochar; lignina Kraft; lignosulfonato; pirólisis; activación con KOH; titulación

Abstract

As part of a doctoral thesis focused on the design of functionalized biochar from industrial lignins for sustainable biodiesel production and CO₂/organic-molecule adsorption, preliminary results from two complementary work lines are presented. At NANOTEC (UTN Facultad Regional Córdoba), the synthesis of biochar by KOH-assisted slow pyrolysis of Kraft lignin was optimized, evaluating activator/precursor ratios between 2.5 and 15 g of KOH per 5 g of lignin and carbonization temperatures between 450 and 600 °C. Formulations with 10 g (Solution A) and 15 g of KOH (Solution B) per 5 g of lignin, at 500 and 550 °C, showed the best performance: Solution A exhibited a higher net washing yield (50.9-58.7 %), while Solution B reached the highest BET surface areas (up to 617 m²/g) and pore volumes (up to 0.42 cm³/g). In parallel, at GPOL (UTN

Facultad Regional San Francisco), conductometric and potentiometric titration techniques were set up to quantify surface acid groups of Kraft lignin (Suzano) and lignosulfonate (LignoTech), yielding total acid group contents of 6.7 and 6.1 mmol/g, respectively, and two well-defined neutralization zones in the potentiometric titration of Kraft lignin. These results constitute the experimental basis for the subsequent activation, functionalization and evaluation stages of the obtained biochars.

Keywords: Biochar; Kraft lignin; lignosulfonate; pyrolysis; KOH activation; potentiometric titration.

Introducción

La creciente demanda energética, junto al agotamiento de los combustibles fósiles y el crecimiento de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) aceleran el desarrollo de tecnologías emergentes derivadas de recursos renovables, como así también de la valorización de residuos industriales (Demirbaş, 2001). El concepto de biorrefinería adquiere un papel protagónico, de la mano del uso de la biomasa lignocelulósica para la obtención de combustibles, productos químicos y materiales avanzados con elevado valor agregado (Ma, y otros, 2012). Es así como la lignina un biopolímero aromático, subproducto clase de la industria papelera, representa entre el 15 y el 30% de la biomasa vegetal, siendo la segunda fuente renovable más abundante del planeta después de la celulosa (Nabais, y otros, 2008).

Numerosos estudios recientes han demostrado que la lignina puede transformarse mediante procesos termoquímicos en materiales carbonosos con propiedades fisicoquímicas con gran interés en aplicaciones ambientales y energéticas (Méndez, Paz-Ferreiro, Araujo, & Gasco, 2014). Destacando al biochar como un sólido rico en carbono obtenido principalmente por pirolisis de biomasa bajo atmósfera inerte (Sri Shalini S., 2021). Las propiedades del biochar dependen de la naturaleza de la biomasa y de variables como la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia de la pirolisis. Para aumentar su área superficial y porosidad, se emplean activaciones físicas o químicas. Entre ellas destaca la activación con KOH como una de las estrategias más eficientes, al promover la gasificación parcial y la reorganización estructural del carbón (Kołtowski, Charmas, Skubiszewska-Zięba, & Oleszczuk, 2017).

La modificación química superficial del biochar, más allá de su optimización en la síntesis, se torna una herramienta fundamental para ajustar sus propiedades según la aplicación buscada. En consecuencia, la incorporación de grupos funcionales ácidos, básicos o nitrogenados modifica su afinidad por diferentes especies químicas, incrementando su desempeño como adsorbente o catalizador heterogéneo (Samuel Lalthazuala Rokhum, 2022). Particularmente, la funcionalización con grupos sulfónicos favorece las reacciones de esterificación y transesterificación para la producción sostenible de biodiésel, a su vez la incorporación de grupos básicos o nitrogenados mejora la interacción con moléculas ácidas como el CO₂, incrementando la capacidad de captura y almacenamiento (Milan D. Kostić, 2016). En la misma línea, el desarrollo de biocarbones con elevadas áreas específicas y una adecuada distribución de grupos oxigenados permite mejorar la adsorción de moléculas orgánicas presentes en efluentes industriales, maximizando su campo de aplicación (Cueto-Díaz, y otros, 2023).

Dentro de las diferentes ligninas disponibles comercialmente, la lignina Kraft y el lignosulfonato representan dos materias primas de gran interés debido a sus propiedades estructurales y químicas. La lignina Kraft, derivada del proceso Kraft de fabricación de pulpa, presenta un elevado contenido de estructuras aromáticas condensadas y grupos fenólicos, mientras que el lignosulfonato incorpora grupos sulfónicos que modifican significativamente su comportamiento químico (Zhou, Xia, Lin, Tong, & Beltramini, 2011). Estas diferencias, previenen que ambos precursores generarán materiales carbonosos con propiedades texturales y superficiales diferentes, por lo que resulta necesario estudiar en forma simultánea la influencia del precursor sobre las características finales del biochar.

El presente trabajo se enmarca dentro de una tesis doctoral cuyo objetivo general consiste en el diseño, síntesis, activación y funcionalización de biochar obtenidos a partir de ligninas industriales para su aplicación como adsorbentes de CO₂ y moléculas orgánicas, así como soportes catalíticos para la producción sostenible de biodiesel mediante reacciones de transesterificación. Para alcanzar dicho objetivo resulta indispensable optimizar, en una primera etapa, las condiciones de

obtención de los materiales carbonosos, y desarrollar metodologías confiables para la caracterización tanto de las materias primas como de los biochar obtenidos.

En este sentido, las actividades desarrolladas hasta el momento comprenden dos líneas de trabajo complementarias. Por un lado, en el Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (NANOTEC de la UTN Facultad Regional Córdoba) se avanzó en la optimización de la síntesis de biochar a partir de lignina Kraft mediante pirolisis lenta asistida con KOH, evaluando el efecto de diferentes relaciones de activador, temperaturas de carbonización y condiciones operativas sobre el rendimiento y las propiedades texturales de los materiales obtenidos. En paralelo, en el Grupo de Investigación y Desarrollo de Polímeros (GPol de la UTN Facultad Regional San Francisco) se inició la caracterización fisicoquímica de las materias primas mediante la puesta a punto de metodologías analíticas, incluyendo determinaciones de conductividad y titulaciones potenciométricas, con el propósito de establecer una base de comparación que permita posteriormente evaluar las modificaciones químicas inducidas por los procesos de carbonización, activación y funcionalización.

Los resultados preliminares obtenidos representan el punto de partida para la optimización integral del proceso de obtención de biochar y constituyen la base experimental sobre la cual se desarrollarán las etapas posteriores de activación, funcionalización y evaluación de los materiales en aplicaciones ambientales y catalíticas.

Desarrollo

El desarrollo experimental de la presente investigación se estructuró en dos líneas de trabajo complementarias, orientadas a la obtención y caracterización de materiales carbonosos derivados de ligninas industriales. La primera de ellas se llevó a cabo en NANOTEC (UTN Facultad Regional Córdoba) y estuvo destinada a la síntesis y optimización de biochar mediante pirolisis lenta asistida con activación química. Paralelamente, en GPol (UTN Facultad Regional San Francisco) se inició la caracterización fisicoquímica de las materias primas, así como la puesta a punto de metodologías analíticas que posteriormente serán aplicadas a los materiales carbonosos obtenidos. Esta estrategia permitió abordar simultáneamente la optimización del proceso de síntesis y el desarrollo de herramientas de caracterización necesarias para comprender la evolución química de los materiales a lo largo de las distintas etapas de la investigación.

Materias primas. Como precursores carbonosos se seleccionaron dos ligninas industriales: Kraft y lignosulfonato. La primera es el material principal de esta etapa inicial por su elevado contenido de carbono aromático, estabilidad térmica y disponibilidad comercial. Por su parte, el lignosulfonato interesa por sus grupos sulfónicos, que aportan propiedades superficiales particulares y reducen la necesidad de funcionalizaciones posteriores. En este período de trabajo que se presenta, los ensayos de síntesis se realizaron exclusivamente con lignina Kraft, mientras que sobre ambas materias primas se iniciaron estudios de caracterización química para establecer sus propiedades iniciales y generar una base de comparación para las futuras etapas de carbonización y activación.

Obtención de biochar. La síntesis de los materiales carbonosos se realizó mediante pirolisis lenta en atmósfera inerte utilizando un horno tubular. Previamente a la carbonización, la lignina Kraft fue impregnada con soluciones acuosas de hidróxido de potasio (KOH), empleando diferentes relaciones activador/precursor con el objetivo de estudiar la influencia de la concentración del agente activante sobre el rendimiento del proceso y las propiedades texturales del material obtenido. Los primeros ensayos experimentales estuvieron orientados a optimizar las condiciones operativas del sistema de pirolisis. Para ello se evaluaron distintos parámetros experimentales, incluyendo la orientación del reactor (horizontal y vertical), el tipo de soporte utilizado para la muestra, la masa alimentada, la concentración de KOH y la temperatura máxima de carbonización. Inicialmente se realizaron experiencias exploratorias a 400 y 450 °C, observándose inconvenientes asociados a la recuperación del sólido, adhesión del carbón a las paredes del reactor y sobrepresión del sistema. A partir de estos resultados se introdujeron modificaciones en el diseño experimental, tales como la utilización de reactores en posición vertical, soportes de lana de vidrio calcinada y muestras de mayor masa, lo que permitió mejorar significativamente la reproducibilidad del proceso y la recuperación del material carbonoso.

Posteriormente se estudiaron diferentes formulaciones de impregnación con KOH y temperaturas finales comprendidas entre 450 y 600 °C, determinándose los rendimientos gravimétricos correspondientes a cada condición experimental. Sobre

la base de estos resultados preliminares se seleccionaron las formulaciones con mejor desempeño para continuar con estudios de mayor escala y posteriores caracterizaciones texturales. Una vez finalizada la pirólisis, los materiales obtenidos fueron sometidos a una etapa de lavado destinada a remover el exceso de activador químico y las sales inorgánicas remanentes. Posteriormente las muestras fueron secadas hasta masa constante y almacenadas para su caracterización.

Caracterización textural de los materiales carbonosos. Los biochar obtenidos bajo las condiciones seleccionadas fueron caracterizados mediante análisis texturales con el objetivo de determinar las propiedades asociadas a su potencial aplicación como adsorbentes y soportes catalíticos. Se evaluó el área superficial específica y el volumen de poro mediante isotermas de adsorción de nitrógeno, permitiendo establecer la influencia de la temperatura de pirólisis y de la relación KOH/lignina sobre el desarrollo de la estructura porosa. Estos resultados constituyeron el principal criterio para seleccionar las condiciones de síntesis más prometedoras y definir las etapas posteriores del proyecto, orientadas a la activación, funcionalización y evaluación de las propiedades adsorbentes y catalíticas de los materiales.

Caracterización de las materias primas. En paralelo con la optimización del proceso de síntesis, se inició la caracterización fisicoquímica de las materias primas en GPOL (UTN Facultad Regional San Francisco). El objetivo de esta etapa fue desarrollar metodologías analíticas capaces de cuantificar las principales propiedades químicas superficiales de las ligninas, las cuales posteriormente serán aplicadas a los biochar obtenidos para evaluar las modificaciones inducidas por los tratamientos térmicos y químicos. Como primera aproximación se realizaron estudios de conductividad sobre soluciones de lignosulfonato sometidas a titulación conductimétrica con hidróxido de sodio, permitiendo analizar el comportamiento de los grupos ionizables presentes en el material y establecer condiciones experimentales reproducibles para futuras determinaciones.

Complementariamente, se desarrolló la puesta a punto de titulaciones potenciométricas aplicadas inicialmente sobre lignina Kraft. Estas determinaciones permitieron identificar regiones características de neutralización y establecer una metodología adecuada para la cuantificación de grupos funcionales superficiales mediante el análisis de curvas de titulación y sus derivadas. La optimización de esta técnica constituye una herramienta fundamental para correlacionar posteriormente la química superficial de los biochar con las condiciones de síntesis y activación empleadas. En conjunto, ambas líneas metodológicas proporcionan información complementaria acerca de la naturaleza química de los precursores y permitirán evaluar la evolución de las funciones superficiales durante las distintas etapas de preparación de los materiales carbonosos.

La metodología adoptada responde a una estrategia secuencial de desarrollo de materiales. Una vez establecidas las condiciones óptimas de síntesis, la investigación continuará con la obtención de biochar a partir de lignosulfonato, la aplicación de tratamientos de activación y funcionalización, y la evaluación de los materiales desarrollados en procesos de adsorción de CO₂, adsorción de moléculas orgánicas y producción sostenible de biodiésel mediante catálisis heterogénea.

Resultados

De las cinco formulaciones de impregnación con KOH ensayadas (entre 2,5 y 15 g de KOH cada 5 g de lignina Kraft), la Solución A (10 g de KOH + 30 mL de H₂O + 5 g de Lignina Kraft) y la Solución B (15 g de KOH + 30 mL de H₂O + 5 g de lignina Kraft) mostraron los mejores rendimientos gravimétricos de pirólisis a 500 y 550 °C, por lo que se seleccionaron para continuar con estudios de mayor escala. El rendimiento neto luego de la etapa de lavado fue levemente superior para la Solución A (50,9 % a 500 °C y 58,7 % a 550 °C) respecto de la Solución B (50,7 % y 57,6 %, respectivamente). Sin embargo, al caracterizar la estructura porosa mediante isotermas de adsorción de N₂, la Solución B presentó mayor desarrollo textural en ambas temperaturas: área superficial de 500,1 y 616,8 m²/g (frente a 446,5 y 595,5 m²/g de la Solución A) y volumen de poro de 0,347 y 0,423 cm³/g (frente a 0,269 y 0,383 cm³/g de la Solución A). En ambos casos, el aumento de la temperatura de carbonización de 500 a 550 °C mejoró sensiblemente el área superficial y el volumen de poro, independientemente de la relación KOH/lignina empleada. Dado que la diferencia relativa entre ambas soluciones a 550 °C (≈ 20 m²/g y $\approx 0,04$ cm³/g) resulta moderada frente al ahorro del 50 % en el consumo de activador que representa la Solución A, esta última se considera la formulación más eficiente para continuar los estudios a 600 °C y su extensión al lignosulfonato.

Respecto de la caracterización fisicoquímica de las materias primas, la titulación conductimétrica ácido-base de las soluciones acuosas de lignosulfonato (LignoTech) exhibió el perfil característico de un polielectrolito, distinguiéndose tres

regiones lineales bien diferenciadas ($R^2 > 0,90$ en todos los casos): una primera caída pronunciada de la conductividad asociada a la neutralización del exceso de NaOH, una segunda región de pendiente reducida vinculada a la neutralización de los grupos ácidos del lignosulfonato, y una tercera región de conductividad creciente correspondiente al exceso de HCl agregado tras el segundo punto de equivalencia. Siguiendo el criterio de determinación de los puntos de equivalencia por intersección de las rectas de regresión de regiones consecutivas, se calculó, por triplicado, el volumen de HCl consumido por los grupos ácidos y, en función de la masa inicial de muestra, un contenido de grupos ácidos totales de 6,23, 6,02 y 6,02 mmol/g ($6,1 \pm 0,1$ mmol/g en promedio), valor consistente con lo reportado para lignosulfonatos comerciales de características similares. Para la lignina Kraft de madera dura (Suzano), la misma técnica conductimétrica arrojó un contenido de grupos ácidos totales de 6,72 mmol/g, del mismo orden de magnitud que el determinado para el lignosulfonato. Este resultado es consistente con el origen de madera dura de la lignina empleada, cuya menor relación guaiacilo/siringilo y su mayor proporción relativa de grupos hidroxilo alifáticos frente a ligninas Kraft de madera blanda favorecen un comportamiento ácido-base de magnitud comparable al del lignosulfonato (Chiappero, Oliveira, Barros, Moura, & Nicolau, 2025).

Por último, la titulación potenciométrica ácido-base de la lignina Kraft evidenció sistemáticamente dos puntos de equivalencia (dos zonas de neutralización) en las cuatro experiencias realizadas, en lugar de los tres puntos habitualmente descriptos para este tipo de determinación —correspondientes al exceso de hidróxido, a los grupos fenólicos y a los grupos carboxílicos (Peralta, Dobler, Lesta, & Nicolau, 2023). La primera zona, atribuible a los grupos ácidos más débiles (fenólicos y/o remanentes de base), presentó un contenido promedio de $7,02 \pm 0,42$ mmol/g (rango 6,62-7,55 mmol/g), mientras que la segunda zona, asociada a los grupos ácidos más fuertes (carboxílicos), arrojó $2,08 \pm 0,51$ mmol/g (rango 1,50-2,60 mmol/g). La ausencia de un tercer punto de inflexión podría atribuirse a un solapamiento parcial de las constantes de disociación de los grupos fenólicos y carboxílicos en el rango de pH estudiado, fenómeno descripto para ligninas Kraft de elevado grado de condensación estructural (Bairami Habashi & Abdollahi, 2020).

Conclusiones

Los resultados preliminares obtenidos permiten concluir que la relación KOH/precursor y la temperatura de carbonización condicionan de manera antagónica el rendimiento gravimétrico y el desarrollo textural de los biochar derivados de lignina Kraft: un menor contenido de activador (Solución A, 10 g de KOH) favorece el rendimiento en peso, mientras que un mayor contenido (Solución B, 15 g de KOH) favorece el área superficial específica y el volumen de poro. Dado que la mejora textural obtenida al duplicar el activador no resulta proporcional al mayor consumo de reactivo, la Solución A se adopta como condición de referencia para continuar la optimización del proceso, incluyendo ensayos a 600 °C y su extensión al lignosulfonato. Las técnicas de conductimetría y titulación potenciométrica acuosa resultaron adecuadas y reproducibles para cuantificar los grupos ácidos superficiales de las materias primas, obteniéndose contenidos de grupos ácidos totales de magnitud comparable para la lignina Kraft (6,7 mmol/g) y el lignosulfonato (6,1 mmol/g), en concordancia con el origen de madera dura de la lignina Kraft empleada. La titulación potenciométrica evidenció únicamente dos zonas de neutralización —fenólica/básica y carboxílica— en lugar de las tres habitualmente descriptas en la bibliografía de referencia, comportamiento que deberá tenerse en cuenta al extender esta metodología a la caracterización superficial de los biochar obtenidos. En conjunto, estos resultados constituyen la base experimental y metodológica sobre la cual se continuará con la síntesis de biochar a partir de lignosulfonato, la activación y funcionalización superficial de los materiales carbonosos, y la evaluación de su desempeño como adsorbentes de CO₂ y de moléculas orgánicas, así como catalizadores heterogéneos para la producción sostenible de biodiesel.

Referencias

Bairami Habashi, R., & Abdollahi, M. (15 de 04 de 2020). Hydroxymethylation followed by α -bromoisobutyrylation as an effective and precise method for characterization of functional groups of hydroxymethylated lignin. (Springer, Ed.) Wood Science and Technology, 54, 615–636. Recuperado el 16 de 10 de 2025, de <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01176-3>

- Chiappero, L., Oliveira, R., Barros, J., Moura, E., & Nicolau, V. (12 de 06 de 2025). Exploring lignin types in circular by design polyethylene blends for injection moulding applications: interactions and properties. (Springer, Ed.) *Clean Technologies and Environmental Policy*. Recuperado el 16 de 10 de 2025, de <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03250-5>
- Cueto-Díaz, E. J., Castro Muñoz, A., Suárez García, F., Alkorta, I., Valles González, M. P., & Mateo-Martí, E. (19 de 07 de 2023). Effect of Surface Organo-Silanization on SBA-15 Mesoporous Silicas in CO₂ Adsorption Processes: Design, Synthesis, and Computational Studies. (A. C. Society, Ed.) *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(28), 11001-11015. doi:10.1021/acs.iecr.3c00475
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357 - 1378. doi:[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Kołtowski, M., Charmas, B., Skubiszewska-Zięba, J., & Oleszczuk, P. (2017). Effect of biochar activation by different methods on toxicity of soil contaminated by industrial activity,. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 136, 119-125. Recuperado el 14 de 09 de 2025, de <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.10.033>.
- Ma, L., Wang, T., Liu, Q., Zhang, X., Ma, W., & Zhang, Q. (01 de 07 de 2012). Una revisión de la conversión termoquímica de biomasa lignocelulósica en China. (Elsevier, Ed.) *Avances en biotecnología*, 30(4), 859-873. Recuperado el 05 de 07 de 2025
- Méndez, A., Paz-Ferreiro, J., Araujo, F., & Gasco, G. (01 de 05 de 2014). Biocarbón procedente de la pirólisis de lodos de papel destintado y su uso en el tratamiento de un suelo contaminado con níquel. (Elsevier, Ed.) *Revista de Pirólisis Analítica y Aplicada*, 107, 46-52. Recuperado el 15 de 07 de 2025
- Milan D. Kostić, A. B. (2016). Optimization and kinetics of sunflower oil methanolysis catalyzed by calcium oxide-based catalyst derived from palm kernel shell biochar. *Fuel*, 163, 304-313. Recuperado el 16 de 08 de 2025, de <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.042>
- Nabais, J., Nunes, P., Carrot, P., Ribeiro Carrot, M., Macías-García, A., & Angeles, D. (01 de 03 de 2008). Production of Activated Carbons from Coffee Endocarp by CO₂ and Steam Activation. *Fuel Processing Technology*, 89, 262-268. Recuperado el 10 de 04 de 2025, de <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2007.11.030>
- Peralta, M., Dobler, S., Lesta, M., & Nicolau, V. (2023). Determinación de grupos hidroxilo fenólicos reactivos en lignina Kraft de madera dura por titulación acuosa potenciométrica. San Francisco, Córdoba, Argentina. Recuperado el 15 de 10 de 2025
- Samuel Lalthazuala Rokhum, B. C. (2022). A one-pot route to tunable sugar-derived sulfonated carbon catalysts for sustainable production of biodiesel by fatty acid esterification. *Renewable Energy*, 184, 908-919. Recuperado el 04 de 09 de 2015, de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.001>
- Sri Shalini S., P. K. (01 de 10 de 2021). Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(5), 2247-2267. doi:10.1007/s13399-020-00604-5
- Zhou, C.-H., Xia, X., Lin, C.-X., Tong, D.-S., & Beltramini, J. (01 de 11 de 2011). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels. *Chemical Society Reviews*, 40(11), 5588 - 5617. Recuperado el 03 de 07 de 2026, de <https://doi.org/10.1039/c1cs15124j>