

TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON PLASMA EN RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE HONGOS BENÉFICOS

SURFACE TREATMENT WITH PLASMA IN AGRO-INDUSTRIAL WASTE FOR THE SUSTAINABLE PRODUCTION OF BENEFICIAL FUNGI

RESUMEN

La tecnología del plasma atmosférico ha emergido como una herramienta innovadora para aportar valor agregado a los residuos agroindustriales y transformarlos en sustratos con características óptimas para la producción y el desarrollo de hongos benéficos y entomopatógenos. La función del plasma en este tipo de residuos es modificar la morfología de la superficie, aumentar la accesibilidad de polisacáridos, introducir grupos funcionales que facilitan la humectabilidad y la adhesión microbiana, y ayudar en el proceso de la hidrólisis en procesos biotecnológicos sujetos a la fermentación. En estas técnicas y procesos con aplicaciones biotecnológicas, la economía circular desempeña un papel fundamental al emplear subproductos agroindustriales (bagazo, residuos de cerveza, aserrín, pulpas y cáscaras). En resumen, la producción de entomopatógenos como *Beauveria bassiana* y *Metarhizium* spp. y de hongos benéficos se beneficia de sustratos con alta porosidad y disponibilidad de carbono, así como de mejoras en las propiedades superficiales que favorecen el desarrollo micelial y la esporulación. Este trabajo de revisión sintetiza avances recientes sobre los fundamentos físico-químicos de la tecnología de plasma aplicada a la biomasa lignocelulósica, ejemplos de pretratamiento y modificación superficial de residuos agroindustriales, impactos en procesos de cultivo fúngico en estado sólido y líquido, desafíos técnicos y de escalado, y la evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del enfoque.

Palabras clave: residuos agroindustriales; lignocelulosa; producción de conidios; modificación superficial.

Biología y Química

Ricardo Gallardo Espinoza ¹, Rosa Idalia Narro Céspedes ¹, Miriam Desiree Dávila Medina ¹, Gabriela Hernández Ramírez ², Brenda Rogelina Cruz Martínez ¹

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Ing. J. Cárdenas Valdez S/N, República, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² TecNM Campus Tierra Blanca Veracruz 95180, Avenida Veracruz S/N esq. C. Héroes de Puebla &, Pemex, 95180 Tierra Blanca, Ver.

Correspondencia: Rosa Idalia Narro-Céspedes, Correo:

rinarro@uadec.edu.mx; ORCID: 0000-0002-3559-1520



CienciAcierta

ABSTRACT

*Atmospheric plasma technology has emerged as an innovative tool for adding value to agro-industrial waste and transforming it into substrates with optimal characteristics suitable for the production and development of beneficial fungi and entomopathogens. The function of plasma in this type of waste is to modify the surface morphology, increase the accessibility of polysaccharides, introduce functional groups that facilitate wettability and microbial adhesion, and assist in the hydrolysis process in biotechnological processes subject to fermentation. In these techniques and processes with biotechnological applications, the circular economy plays a fundamental role by using agro-industrial by-products (bagasse, beer waste, sawdust, pulp, and shells). In summary, the production of entomopathogens such as *Beauveria bassiana* and *Metarhizium* spp. and beneficial fungi benefits from substrates with high porosity and carbon availability and from improvements in surface properties that favor mycelial development and sporulation. This review synthesizes recent advances in the physical-chemical fundamentals of plasma technology applied to lignocellulosic biomass, examples of pretreatment and surface modification of agro-industrial waste, impacts on solid-state and liquid fungal cultivation processes, technical and scaling challenges, and the assessment of the environmental and economic sustainability of the approach.*

Keywords: agro-industrial waste; lignocellulose; conidia production; surface modification.

INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos agroindustriales —restos de cosecha, subproductos de la industria alimentaria y lignocelulosa residual— plantea un doble reto y una oportunidad para las cadenas agroalimentarias: por un lado, la gestión y disposición de dichos residuos sigue ocasionando impactos ambientales y costos económicos; por otro, estos materiales constituyen fuentes ricas en carbono, nutrientes y biomoléculas que pueden valorizarse mediante procesos biotecnológicos para producir insumos agrícolas de bajo impacto, como biopesticidas, biofertilizantes y materiales a base de



micelio (FAO, 2023). En este contexto, las estrategias de economía circular y bioeconomía promueven la transformación de residuos en productos de valor agregado, reduciendo la presión sobre los recursos y las emisiones y aportando beneficios socioeconómicos locales (CIHEAM, 2022).

La dificultad principal para utilizar los residuos vegetales (lignocelulósicos) es que son muy duros y difíciles de descomponer. Esto se debe a que la lignina los protege y la celulosa está muy compacta, lo que impide que las enzimas y los microbios actúen adecuadamente y complica procesos como la fermentación o la colonización micelial en cultivos sólidos. Tradicionalmente se han usado pretratamientos químicos, térmicos o enzimáticos para superar esta barrera, pero muchos de ellos implican costos elevados, consumo de energía o generación de efluentes que contrarían los objetivos de sostenibilidad. En las últimas décadas, el tratamiento superficial con plasma ha surgido como una alternativa atractiva y complementaria: los plasmas a baja temperatura (cold plasma o plasma atmosférico) producen una mezcla reactiva de especies (radicales, iones, UV, electrones) capaces de interactuar con la superficie del sustrato, rompiendo enlaces, oxidando componentes y generando grupos funcionales como carbonilos, carboxilos e hidroxilos que incrementan la hidrofilia y la reactividad química de la biomasa. Estas modificaciones suelen limitarse a la capa superficial (micras), lo que reduce la formación de productos tóxicos y el consumo energético en comparación con pretratamientos severos (Abolore, 2025).

Diversas investigaciones recientes han mostrado que el plasma puede mejorar la digestibilidad enzimática de residuos para su bioconversión, facilitar la colonización de sustratos por hongos beneficiosos y aumentar la producción de esporas en cultivos en estado sólido (Sala, 2024). Por ejemplo, la modificación de la textura y la inclusión de sitios de anclaje superficial favorecen la adhesión conidial y el establecimiento del micelio en sustratos agroindustriales, lo cual es crítico para la producción de biopesticidas entomopatógenos y de formulaciones miceliales. Paralelamente, tecnologías de fermentación en lecho empaquetado y en reactores de estado sólido han demostrado su viabilidad cuando se optimizan la humedad, la aireación y la relación C/N, usando subproductos como el bagazo de cerveza o residuos de frutas (Sala, 2024).

Sin embargo, la transición del concepto a la industria enfrenta retos: variabilidad composicional de los residuos (por origen, estacionalidad y procesamiento), falta de protocolos estandarizados de tratamiento por plasma (tipo de plasma, gases portadores, energía, tiempo, geometría del reactor), incertidumbres sobre los efectos a escala y sobre la evaluación del ciclo de vida completo (impacto energético y huella ambiental). Además, en aplicaciones agrícolas, resulta imprescindible asegurar que los tratamientos no generen subproductos tóxicos y que las mejoras tecnológicas sean económicamente competitivas frente a los sustratos comerciales (Zhang y col., 2021).

El objetivo de esta revisión es integrar evidencia reciente (2020–2025) sobre el uso de tratamientos superficiales por plasma aplicados a residuos agroindustriales, con el fin de mejorar la producción sostenible de hongos benéficos. Se examinan: las bases físico-químicas de la interacción plasma-biomasa y las modificaciones superficiales observadas; evidencia experimental de mejoras en procesos fúngicos (en estado sólido y líquido) y ejemplos de sustratos transformados; enfoques de escalado y tecnologías de reactor relevantes; y la evaluación de la sostenibilidad y de las principales brechas de investigación. La revisión también incorpora informes institucionales y documentos de política que enmarcan la importancia de estos enfoques en estrategias de bioeconomía y de manejo de residuos, para ofrecer una visión integradora, aplicable a programas de investigación y a desarrollos tecnológicos orientados a congresos y a redes de transferencia tecnológica.

Los residuos agroindustriales representan una fracción significativa de los desechos sólidos generados en los sistemas alimentarios mundiales. De acuerdo con estimaciones recientes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Gómez y col., 2023). Cerca del 30 % de los subproductos agrícolas y agroindustriales no se reutilizan ni valorizan, pese a que contienen grandes cantidades de compuestos orgánicos aprovechables. Estos incluyen materiales lignocelulósicos (paja, bagazo, aserrín, cascarillas, pulpas y tallos) y residuos ricos en carbohidratos o proteínas derivados del procesamiento de frutas, cereales, café y caña de azúcar (Puač y col., 2022).

En países con actividad agroexportadora, como México, Brasil y Colombia, la generación de estos residuos ha aumentado

proporcionalmente al crecimiento de la producción agrícola e industrial, lo que ha generado impactos ambientales asociados al manejo inadecuado: emisiones de gases de efecto invernadero por la descomposición anaerobia, proliferación de plagas y contaminación de suelos y cuerpos de agua (García y col., 2022). En este escenario, la valorización biotecnológica de los residuos agroindustriales se ha convertido en un pilar de la economía circular (Figura 1), con el objetivo de transformar desechos en materias primas para bioproductos como enzimas, bioetanol, biogás, biopesticidas o biomateriales fúngicos (Tendero y col., 2023).



Figura 1. Esquema aprovechamiento integral residuos para producción sostenible de valor.

TIPOS DE PLASMA Y SISTEMAS DE DESCARGA

Entre las configuraciones más utilizadas destacan:

- Descarga de barrera dieléctrica (DBD), adecuada para superficies planas o lechos fluidizados.
- Plasma de microondas, útil para el tratamiento homogéneo de fibras o partículas pequeñas (Tiwari y col., 2019).
- Plasma de radiofrecuencia (RF) y chorros de plasma atmosférico (APPJ), empleados en procesos continuos y de baja temperatura (Kim, 2023).

Cada tipo de plasma ofrece un espectro distinto de especies reactivas, como radicales de oxígeno (O, OH), de nitrógeno (NO, N₂⁺) o de carbono, que interactúan con la superficie del material y modifican su energía.

INTERACCIÓN PLASMA-MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

Cuando la superficie de un material lignocelulósico entra en contacto con el plasma, las especies reactivas rompen enlaces C-H, C-O y C-C

superficiales, eliminan contaminantes y modifican la topografía del sustrato. A nivel químico, se introducen grupos funcionales oxigenados ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$) que incrementan la energía superficial y la afinidad por el agua, mejorando la humectabilidad y la adhesión celular (Pérez y col., 2021). A nivel físico, se produce una microerosión superficial que aumenta la rugosidad y la porosidad, lo que facilita la colonización del micelio. En los residuos vegetales, estos efectos dependen de variables como la potencia, la frecuencia, el tiempo de exposición y el tipo de gas. Por ejemplo, un estudio de Abolore (2025), reportó que el tratamiento con plasma de oxígeno a 20 W durante 5 min aumentó la humectabilidad del bagazo de caña en un 65 % y redujo el contenido superficial de lignina detectado por espectroscopía FTIR. De manera similar, en pajas de arroz y cáscaras de café, el plasma de aire incrementó en hasta un 40 % la tasa de germinación de *B. bassiana* y *Trichoderma harzianum* sobre los sustratos tratados, atribuido a una mejor adhesión de conidios y a una mayor disponibilidad de sitios de anclaje.



Figura 2.

Representación de la tecnología de plasma que interactúa con el material lignocelulósico para la modificación superficial.

INFLUENCIA SOBRE LA ADHESIÓN Y EL CRECIMIENTO FÚNGICO

Los cambios en la morfología y la química superficial generados por el plasma pueden modificar la energía libre de superficie, lo que aumenta la afinidad por soluciones acuosas y nutrientes. Esta propiedad es crucial para el establecimiento de hongos entomopatógenos, ya que la germinación de las esporas depende de la disponibilidad de agua y del contacto efectivo con el sustrato. Además, se ha observado que las superficies tratadas con plasma presentan una mayor rugosidad, lo

que proporciona más sitios de anclaje para la fijación de esporas y la expansión micelial (Gómez y col., 2018).

En consecuencia, el tratamiento con plasma no solo mejora la compatibilidad físico-química entre el residuo y el microorganismo, sino que también contribuye a reducir el tiempo de fermentación e incrementar la productividad fúngica (Klébert y col., 2024).

CARACTERIZACIÓN DE LAS MODIFICACIONES SUPERFICIALES

Para evaluar los efectos del tratamiento por plasma, se emplean técnicas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de ángulo de contacto, y XPS (espectroscopía de fotoelectrones de rayos X). Los espectros FTIR muestran generalmente bandas asociadas a carbonilos ($\sim 1720\text{ cm}^{-1}$) y carboxilos ($\sim 1630\text{ cm}^{-1}$), mientras que los análisis SEM revelan superficies más rugosas y porosas (Zhou y col., 2023). Estos cambios explican la mejora en la humectabilidad, que suele medirse mediante la reducción del ángulo de contacto del agua de más del 30 % tras el tratamiento.

Además, el plasma puede generar cargas eléctricas superficiales que modifican la energía de adhesión y la interacción con esporas o enzimas, lo que afecta los procesos de colonización y biodegradación. La versatilidad de estos efectos permite ajustar los parámetros del tratamiento para distintos objetivos: aumentar la reactividad para hidrólisis enzimática, mejorar la adhesión de microorganismos, o limpiar y esterilizar materiales (Fridman, 2023).

PARÁMETROS CRÍTICOS DEL PROCESO

Los efectos del plasma dependen fuertemente de variables operativas como:

- Tipo de gas y flujo (aire, oxígeno, argón, nitrógeno);
- Potencia y frecuencia de la descarga;
- Distancia electrodo–sustrato y tiempo de exposición;
- Humedad relativa del ambiente.

Optimizar estas condiciones es esencial para evitar la sobreoxidación o la degradación térmica de la biomasa (Dimitrakellis y col., 2022). Por ejemplo, tratamientos cortos (1–5 min) con plasma de aire a baja

potencia pueden incrementar la hidrofilia sin alterar significativamente la estructura de la celulosa, mientras que exposiciones prolongadas podrían causar carbonización superficial o pérdida de masa (Oliveira y col., 2022).

En la práctica, se busca un equilibrio entre la modificación química y la estabilidad estructural, adaptado al tipo de residuo y al microorganismo objetivo. En el caso de hongos entomopatógenos, una modificación moderada suele ser suficiente para mejorar la esporulación sin alterar el contenido nutricional del sustrato (Oliveira y col., 2022).

CAMBIOS MORFOLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS

El impacto del plasma sobre la superficie de los residuos lignocelulósicos se manifiesta principalmente mediante procesos de erosión superficial controlada. Los iones y radicales generados en el plasma colisionan con la superficie del material, lo que permite remover selectivamente fragmentos de lignina y hemicelulosa. Como resultado, se produce un aumento de la rugosidad y del área superficial específica, lo que mejora la adsorción de agua y la colonización micelial (Merlo y col., 2023).

En estudios con cáscaras de café y bagazo de caña, los tratamientos con plasma de aire y oxígeno produjeron microfisuras y cavidades que incrementaron la retención de humedad del material hasta en un 45 %. Este aumento de la capacidad de hidratación es fundamental para procesos de fermentación en estado sólido, en los que la disponibilidad hídrica determina el crecimiento fúngico y la esporulación (Primc y col., 2025).

MODIFICACIONES QUÍMICAS EN LA SUPERFICIE

A nivel químico, el plasma introduce grupos funcionales oxigenados — hidroxilos ($-OH$), carbonilos ($C=O$) y carboxilos ($-COOH$)— que incrementan la polaridad y la energía superficial del sustrato. Estas modificaciones mejoran la humectabilidad y la afinidad por el agua, reduciendo el ángulo de contacto en más del 30 %, lo que facilita la difusión de nutrientes y la adhesión celular. Además, se ha observado la despolimerización parcial de la lignina, lo que expone las

microfibrillas de celulosa y genera sitios activos para la interacción con enzimas hidrolíticas o con hifas fúngicas. Los análisis mediante FTIR y XPS muestran incrementos notables en los picos de absorción asociados a los grupos carbonilo ($\sim 1730\text{ cm}^{-1}$) y carboxilo ($\sim 1620\text{ cm}^{-1}$), lo que evidencia una oxidación superficial inducida por el plasma. Paralelamente, los cambios en la composición superficial —evaluados mediante la relación O/C— confirman una mayor proporción de oxígeno tras el tratamiento, lo que sugiere una mejora en la compatibilidad biológica del sustrato (Duan y col., 2024).

EFFECTOS SOBRE LA ESTERILIDAD Y LA CARGA MICROBIANA

Otra ventaja importante del plasma es su capacidad para reducir la carga microbiana en la superficie de los residuos, actuando como un proceso de esterilización en frío. Los radicales libres y la radiación UV generados durante la descarga dieléctrica alteran las membranas celulares y el ADN de microorganismos contaminantes, sin requerir altas temperaturas. Esto permite eliminar bacterias y hongos indeseables antes de la inoculación con especies benéficas (Figura 3), lo que reduce la competencia microbiana y mejora la eficiencia del proceso (Lunder y col., 2024)

En ensayos de Abolore (2025), el plasma de oxígeno redujo la carga bacteriana inicial en residuos lignocelulósicos en más del 90 %, lo que permitió el uso de los materiales sin autoclave en cultivos de *Beauveria bassiana*, con resultados comparables a los de sustratos esterilizados térmicamente. Este efecto sinérgico —modificación superficial y desinfección simultánea— representa un avance significativo hacia procesos más sostenibles y de bajo consumo energético (Ahmed y col., 2025).



Figura 3.
Representación de la tecnología de plasma de radiofrecuencia sobre la esterilidad y carga microbiana

RELACIÓN CON LA ADHESIÓN Y COLONIZACIÓN MICELIAL

La colonización exitosa de los sustratos por hongos benéficos depende en gran medida de la interacción física y química entre el micelio y la superficie del sustrato. Los tratamientos con plasma aumentan la rugosidad y la polaridad, lo que favorece la adhesión inicial de las esporas y la formación de hifas ancladas a microcavidades. En *Beauveria bassiana*, la germinación de conidios en sustratos tratados con plasma mostró incrementos de hasta un 60 % en comparación con sustratos sin tratamiento (Lunder y col., 2024).

Estos hallazgos sugieren que el plasma no solo actúa como pretratamiento físico, sino también como modificador biológico indirecto, al crear microambientes más favorables para el establecimiento de microorganismos de interés biotecnológico.

PRODUCCIÓN DE HONGOS ENTOMOPATÓGENOS

Los hongos entomopatógenos, como *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* e *Isaria fumosorosea*, son agentes de control biológico ampliamente utilizados contra insectos-plaga. Su producción eficiente depende de la disponibilidad de sustratos económicos y adecuados para la formación de conidios viables. Estudios recientes indican que el tratamiento superficial de residuos agroindustriales con plasma puede aumentar la germinación, la adhesión y la esporulación de estos hongos (Lunder y col., 2024).

En un experimento realizado por Sala (2024), el tratamiento del bagazo de caña con plasma de aire durante 10 minutos elevó en un 70 % la producción de conidios de *B. bassiana* en fermentación en estado sólido, con una viabilidad superior al 95 %. Los análisis de FTIR revelaron una disminución de la señal característica de lignina (1510 cm^{-1}) y un incremento de los grupos carbonilo, lo que sugiere una oxidación favorable para la adhesión micelial. Además, se observó un aumento de la rugosidad superficial, evidenciado por imágenes SEM, lo que favoreció la retención de humedad y una colonización más uniforme del hongo.

Otra línea de aplicación relevante es la modificación de soportes para formulaciones fúngicas. Los polvos o gránulos utilizados en bioinsecticidas pueden ser tratados con plasma para mejorar la estabilidad, la dispersión y la adherencia de las esporas, sin recurrir a aditivos químicos. Estos desarrollos pueden reducir costos y prolongar la vida útil de los productos biológicos destinados al control de plagas agrícolas.

BIOTRANSFORMACIÓN Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

El tratamiento con plasma también se está explorando como etapa previa en procesos de biotransformación de residuos agroindustriales (Figura 4). Al romper parcialmente las cadenas lignocelulósicas, el plasma aumenta la susceptibilidad del material a la hidrólisis y a la fermentación, mejorando la conversión en bioproductos (bioetanol, enzimas, biogás). Cuando estos procesos se combinan con hongos degradadores, como *Pleurotus ostreatus* o *Aspergillus niger*, el rendimiento de azúcares fermentables y de biomasa fúngica se incrementa significativamente.

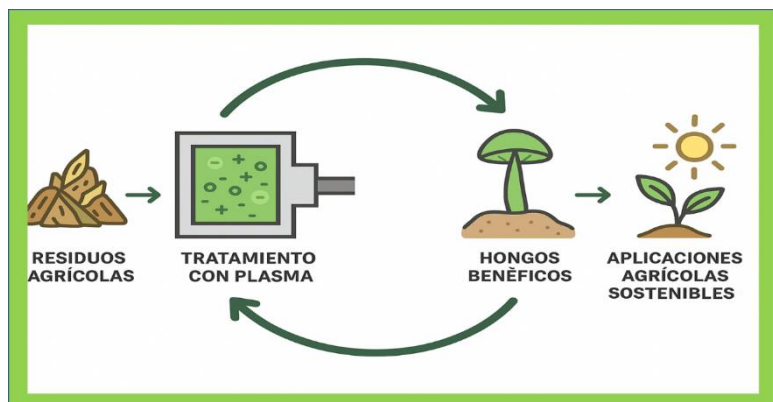


Figura 4.
Proceso innovador para la valorización de residuos agrícolas materiales de desecho de la agricultura

En sistemas integrados, se ha planteado el uso del plasma como tecnología de reactivación de biomasa previa a la fermentación en estado sólido, lo que podría reducir los tiempos de incubación y aumentar la productividad. Este tipo de integración tecnológica se alinea con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética planteados en la Agenda 2030 (PNUMA, 2024).

CONCLUSIÓN

El tratamiento superficial con plasma aplicado a residuos agroindustriales constituye una estrategia innovadora y sostenible para optimizar la producción de hongos benéficos. Esta tecnología permite modificar las propiedades físico-químicas del sustrato —como la rugosidad, la humectabilidad y la energía superficial—, facilitando la adhesión y el crecimiento micelial sin generar residuos químicos ni impactos ambientales significativos. Al emplear subproductos como la cáscara de café, el bagazo de caña o el olote de maíz, se promueve la valorización de los desechos agrícolas dentro de un modelo de economía circular. En conjunto, la integración del plasma en bioprocesos de fermentación sólida contribuye al desarrollo de sistemas biotecnológicos más eficientes, seguros y alineados con los objetivos de sostenibilidad y producción limpia establecidos en la Agenda 2030.

REFERENCIAS

- Abolore, R. S. (2025). A comprehensive review of the application of cold plasma technology in lignocellulosic biomass pretreatment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2025: 1-5.
- Ahmed, M. W., Gul, K., & Mumtaz, S. (2025). Recent Advances in Cold Atmospheric Pressure Plasma for Escherichia coli Decontamination in Food: A Review. *Plasma*, 8(2): 18. <https://doi.org/10.3390/plasma8020018>.
- CIHEAM / Iamm. (2022). Circular bioeconomy of agri-food value chains (policy document).
- Dimitrakellis, P., Delikonstantis, E., Stefanidis, G. D., & Vlachos, D. G. (2022). Plasma technology for lignocellulosic biomass conversion toward an electrified biorefinery. *Green Chemistry*, 24: 2680-2721. <https://doi.org/10.1039/D1GC03436G>.
- Duan, Z., Li, X., Wang, J., & Li, P. (2024). Effects and modification mechanisms of different plasma treatments on wood surface wettability and chemistry. *Forests*, 15(7): 1271. <https://doi.org/10.3390/f15071271>.
- Farooq, S., & colaboradores. (2023). Cold plasma treatment advancements in food processing and microbial inactivation: a review. *Foods*, 12(7), 1345. <https://doi.org/10.3390/foods12071345>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). Bioeconomy for sustainable food and agriculture. FAO Open Knowledge Repository. [turn0search10].
- Fridman, A. (2023). *Plasma Chemistry and Plasma Processing for Sustainable Applications*. Springer.
- García, A., López, J., & Pineda, C. (2022). Evaluación del manejo de residuos agroindustriales en América Latina. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Ambiental*, 38(2): 121–135.
- Gómez, M., Hernández, P., & López, J. A. (2023). Advances in biotechnological valorization of agro-industrial residues. *Bioresource Technology Reports*, 22: 101234.
- Gómez-Méndez, L. D., Moreno-Bayona, D. A., Poutou-Piñales, R. A., Salcedo-Reyes, J. C., Pedroza-Rodríguez, A. M., Vargas, A., et al. (2018). Biodeterioration of plasma pretreated LDPE sheets by *Pleurotus ostreatus*. *PLoS ONE*, 13(9): e0203786. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203786>



- Gutiérrez-Cárdenas, O. G. (2024). Hongos entomopatógenos endófitos: estado global, éxitos, fracasos y perspectivas de aplicación en campo. *Biotecnia*, 26: e1986. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.1986>.
- Hoppanová, L., & Kryštofová, S. (2022). Nonthermal plasma effects on fungi: applications, fungal responses, and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19): 11592. <https://doi.org/10.3390/ijms231911592>.
- Kim, H. T. (2023). Review of Plasma Processing for Polymers and Bio-Materials. *Polymers*, 15(13): 2850. <https://doi.org/10.3390/polym15132850>.
- Klébert, S., Kosa, T., Lampl, M., & Libant, M. (2022). Can plasma surface treatment replace traditional wood modification methods? *Coatings*, 12(4): 487. <https://doi.org/10.3390/coatings12040487>.
- Li, J., Ma, C., Zhu, S., Yu, F., Dai, B., & Yang, D. (2019). A review of recent advances of dielectric barrier discharge plasma in catalysis. *Catalysis Today*, 2019: 6836096. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6836096/>
- Lunder, M., Gach, P., & colectivo. (2024). Cold atmospheric plasma for surface disinfection. *Journal of Hospital Infection*, 124: 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2023.10.034>.
- Merlo, F., Profumo, A. y Speltini, A. (2023). Sample treatment for the determination of steroid hormone contaminants in water samples: Analytical greenness assessment. *Trends in Analytical Chemistry*, 169: 117393. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117393>.
- Oliveira, M., Ramos, A., Ismail, T. M., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2022). A Review on Plasma Gasification of Solid Residues: Recent Advances and Developments. *Energies*, 15(4): 1475. <https://doi.org/10.3390/en15041475>
- Pérez, G. N., Cesca, K., Vieira Cubas, A. L., & de Oliveira, D. (2021). Use of non-thermal plasma in lignocellulosic materials: A smart alternative. *Trends in Food Science & Technology*, 109: 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.003>
- Primc, G., & Mozetič, M. (2025). Plasma treatment of cellulose as the first step in the synthesis of second-generation biofuel. *Polymers*, 17(6): 782. <https://doi.org/10.3390/polym17060782>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible: avances y



- desafíos hacia la sostenibilidad global. Naciones Unidas. <https://www.unep.org/es>
- Puač, N., Gherardi, M., & Shiratani, M. (2022). Plasma agriculture: physics, chemistry, and future perspectives. *Plasma Processes and Polymers*, 19(1): 2100211.
- Sala, A. (2024). Harnessing packed-bed bioreactors' potential in solid-state fermentation for *Beauveria bassiana*. *Fermentation*, 10(9): 481.
- Tendero, C., Gámez, C., & Amor, M. (2023). Surface modification of lignocellulosic materials using non-thermal plasma. *Surface and Coatings Technology*, 465: 129444.
- Tiwari, S., Caiola, A., Bai, X., Lalsare, A., & Hu, J. (2019). Microwave plasma-enhanced and microwave heated chemical reactions. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(4): 791-818. <https://doi.org/10.1007/s11090-019-10040-7>.
- Zhang, H., Li, H., & Sun, C. (2021). Structural limitations of lignocellulosic residues in microbial conversion processes. *Renewable Energy*, 177: 1432–1445.
- Zhou, L., Kim, H., & Wang, J. (2023). Surface oxidation of lignocellulosic biomass by dielectric barrier discharge plasma. *Surface and Coatings Technology*, 467: 129456.