

Obtención de bioetanol a partir de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos

“Obtaining bioethanol from leachates from urban solid waste

Laura Daniela Hernández Vázquez¹, Alma Hortensia Serafín Muñoz¹, José Ignacio Ceseña Quiñonez¹.

¹Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ingenierías.
ld.hernandezvazquez@ugto.mx¹, *sermuah@ugto.mx¹

Resumen

La producción de bioetanol es uno de los bioproductos que impacta dentro del comercio internacional de los biocombustibles, teniendo el 90% de la producción total. Se llevó a cabo un estudio sobre la obtención de bioetanol a partir de los lixiviados originarios de la fracción orgánica de los RSU; durante el proceso se realizaron diferentes etapas, las cuales fueron desde la recolección de residuos hasta la fermentación y destilación de los lixiviados. El obtuvo rendimientos de bioetanol del 54 ± 0.15 al 82 ± 0.88 % partiendo de lixiviados provenientes de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU). Esto nos permite analizar la viabilidad que tiene la obtención de bioetanol a partir del lixiviado de residuos orgánicos, además del aprovechamiento de los propios RSU y la implementación de una economía circular dentro de la población.

Palabras clave: Biocombustibles; Bioetanol; Lixiviado; Residuos orgánico-agroalimentarios; Glucosa; *Saccharomyces cerevisiae*, Fermentación de glucosa.

Abstract

The production of bioethanol is one of the bioproducts that impacts the international trade of biofuels, accounting for 90% of the total production. A study was carried out on obtaining bioethanol from leachates originating from the organic fraction of MSW; During the process, different stages were carried out, which ranged from waste collection to fermentation and distillation of the leachates. The highest concentration of bioethanol (9 mL and 7.11 gr) and yield (82.19%) was a product of the leachate enriched with a concentration of 200g/L of glucose. This allows us to analyze the viability of obtaining bioethanol from the leachate of organic waste, in addition to the use of MSW and the implementation of a circular economy within the population.

Key words: Biofuels; Bioethanol; Leachate; Organic agri-food waste; Glucose; *Saccharomyces cerevisiae*, glucose fermentation.

Introducción

Los biocombustibles desde el siglo XX han sido estudiados como una alternativa y necesidad para la humanidad, debido a que los combustibles fósiles al ser un recurso no renovable se están agotando (Li et al., 2022; Venkata Mohan et al., 2016). También han surgido como una solución ante una de las problemáticas medioambientales más importantes a nivel mundial, la mala gestión de residuos. Esta problemática se representa en las ciudades debido a las grandes cantidades de residuos orgánicos que se generan a diario, en especial de aquellos comercios agroalimentarios, como las fruterías, mercados, supermercados, centrales de basto, e incluso domiciliarios, que les dan una vida útil corta a sus residuos, pudiendo ampliarla y contribuir a la economía circular (Agrawal et al., 2023; Kumar & Verma, 2024; Mehmood et al., 2022; Venkata Mohan et al., 2016).

Los biocombustibles han sido clasificados en primera, segunda y tercera generación, dependiendo de la materia prima, el proceso y los resultados. La materia con un contenido lignocelulósico se considera una de las mejores para la producción de bioetanol de segunda generación; así como la materia orgánica procedente de remanentes industriales, agroindustriales y domésticos. Estos tipos de residuos cuando se encuentran en

grandes cantidades y acumulaciones generan un impacto directo al medio ambiente (González-Contreras et al., 2023; Velvizhi et al., 2020). Por lo que ha surgido la necesidad de corregir y evitar este gran impacto, aprovechándose estos residuos para producir bioetanol y llevar a cabo la economía circular. La producción de bioetanol es uno de los bioproductos que impacta dentro del comercio internacional de los biocombustibles, teniendo el 90% de la producción total. El bioetanol es principalmente producido a partir de la caña de azúcar en Brasil, mientras que en Estados Unidos se genera del maíz. A nivel mundial, el bioetanol es utilizado y añadido en mezclas con gasolina en diferentes porcentajes, ya sea para automóviles u otras maquinarias. A partir de que Estados Unidos implementó las medidas para prohibir la adición de MTBE en la gasolina el mercado de bioetanol se consolidó y comenzó a usarse como reemplazo del aditivo mencionado, llevando al bioetanol a tener una gran demanda y crecimiento comercial (Perez-Pimienta et al., 2017; Zabed et al., 2023). México al ser un país petrolero se ve enfrentado a una de las crisis energéticas más grandes, debido al desabasto de combustibles fósiles. Pero también al ser un país agricultor puede obtener materia orgánica para la producción de biocombustibles. A comparación de Estados Unidos, Alemania, Japón y China, México no está en la posición de utilizar maíz como fuente primaria, debido a que el maíz forma parte de la base alimenticia de la población mexicana (Manikandan et al., 2023; Mukhtar et al., 2022). Por lo que se ha ido estudiando la materia orgánica con contenido lignocelulósico que se pueda utilizar para genera bioetanol de segunda generación, esto sin afectar la alimentación de la población.

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos contienen celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales son muy importantes, ya que a partir de estos es posible la síntesis de bioetanol y biobutanol. La síntesis se puede fraccionar en diferentes etapas. En las primeras etapas se encuentra el pretratamiento de los residuos, con el objetivo de facilitar una degradación eficiente de la glucosa por los microorganismos. Existen varios tipos de pretratamientos, como, los mecánicos, térmicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos (Gómez et al., 2022(Serafín Muñoz et al., 2019)).

En el presente trabajo se estudió la obtención de bioetanol a partir de lixiviados producidos por la materia agroalimentaria originaria de establecimientos agro-mercantiles, y el potencial de producción de bioetanol; con el objetivo de implementar la economía circular dentro del Estado de Guanajuato, y evitarla generación de grandes volúmenes de residuos orgánicos que después no podrán ser aprovechados.

Metodología

El procedimiento para la obtención de bioetanol a partir de los lixiviados de RSU se conforma por cuatro etapas: recolección y procesamiento de RSU, determinación de azúcares reductores, fermentación con *S. cerevisiae*, y evaporación y destilación del lixiviado, en la figura 1 se muestra el esquema metodológico general.

Recolección y procesamiento de residuos orgánicos. Se llevó a cabo dos recolecciones de RSU (la primera el 17 de junio del 2024 y la segunda el 03 de julio de 2024), provenientes de las fruterías de la ciudad de Guanajuato, Gto., México. En la primera colecta se reunió mayor cantidad de residuos vegetales, mientras que en la segunda colecta se obtuvo, en su mayoría, de tipo frutales. Una vez obtenidos los RSU se procesaron para obtener materia prima en fracciones sólida y líquida (lixiviados). La fracción líquida se almacenó a 4°C para su preservación.

Determinación de azúcares reductores (AR). Para determinar los AR presentes en los lixiviados, se llevó a cabo la técnica de determinación de azúcares reductores de Miller (Ayala et al., 2021; Chaudhary, Hussain, et al., 2021) en la cual se preparó el reactivo DNS con tartrato de sodio-potasio, NaOH y DNS, después se realizó una curva de calibración a partir de una solución madre de glucosa 4 g/L de concentración, preparada con dextrosa anhidra, los puntos de la curva comprendieron concentraciones de 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g/L. una vez concluido el tiempo de reacción las muestras se analizaron mediante espectrofotometría UV-VIS (Viales HACH - DR3900) empelando una longitud de onda de 540 nm. Con el propósito de obtener la mayor cantidad de azúcares simples o fermentables, se llevó a cabo la sacarificación por medio de hidrólisis ácida con H₂SO₄ en diferentes concentraciones (1, 2, 4, 8 y 16%) a partir de una solución madre de concentración del 40%, esto a una relación de 2:1 (v/v) para conocer la concentración más adecuada sin dañar la estructura de los azúcares reductores. En base a estudios preliminares las condiciones de hidrólisis fueron a una de temperatura de 40 °C, 150 rpm y en un tiempo de 4 h (Jiménez Islas et al., 2012; Serafín Muñoz et al., 2019; Sánchez et al., 2023). Se analizaron las muestras mediante espectrofotometría UV-VIS (Viales HACH - DR3900) a 540 nm. Con base a la curva de calibración de glucosa y el resultado obtenido de las lecturas en espectrofotometría; se tomó la decisión de no someter el lixiviado frutal a hidrólisis ácida.

Fermentación. Una vez que se procesó y determinó la concentración de azúcares reductores en el lixiviado fresco, se procedió a la inoculación con *Saccharomyces cerevisiae*. Esta especie de hongo fue seleccionada por su capacidad y eficiencia para degradar glucosa. En esta etapa de la fermentación se preparó un blanco de contenido por medio de cultivo YPG (100ml); un control con inóculo (6ml) y medio de cultivo YPG (94ml); una muestra de lixiviado sin enriquecer compuesto por inóculo (6 ml), medio de cultivo YPG (9 ml) y lixiviado (85 ml); y un duplicado del lixiviado con inóculo (6 ml), medio de cultivo YPG (9 ml) y lixiviado (85 ml) enriquecido con dextrosa anhidra. Al lixiviado enriquecido se modificó la concentración a 200 g/L. La preparación de las muestras se realizó dentro de una campana de flujo laminar para tener mayor grado de esterilidad. Los matraces con las muestras se llevaron a la incubadora a una temperatura estable de 37°C por 72 horas. De acuerdo con la literatura en el tercer día se espera tener la conversión máxima o la mayor cantidad de bioetanol obtenido (Marques & Aguiar-Oliveira, 2020; Valdez Castillo et al., 2020).

Evaporación y destilación del lixiviado. En esta etapa se llevaron a cabo dos procesos de separación, primer se realizó la evaporación a vacío empleando un Roto Vapor R52 de ECOSHEL para la obtención de una fracción líquida conformada por los componentes orgánicos (incluido el etanol) y agua a condiciones de temperatura de calentamiento 40°C y 4°C de enfriamiento, se contaba con vacío en el sistema, una rotación de entre 87 y 90 rpm. El segundo proceso consistió en la destilación del evaporado obtenido para la separación de bioetanol a un rango temperatura de 75°C a 80°C, esto para asegurarnos de que el compuesto que se estaba evaporando y condensando era el etano (Chaudhary, Akram, et al., 2021; Ma et al., 2024).

Determinación Etanol. Se tomaron 500 µl de las muestras las cuales fueron centrifugadas a 10,000 rpm x 15min, posteriormente fueron diluidas con acetonitrilo, el cual fue usado como estándar interno. Posteriormente fueron introducidas al Cromatógrafo de Gases con detector de ionización de llama (FID (CG-FID, Perkin Elmer) (Bonilla-Hermosa et al., 2014; Kotarska et al., 2019; Ortega et al., 2021; Serafín Muñoz et al., 2019).

Rendimiento del etanol. Para el cálculo del rendimiento de etanol, se tomó la cantidad de etanol destilado en relación con el etanol teórico, ecuación (1) (González-Gloria et al., 2023; Sindhu et al., 2020).

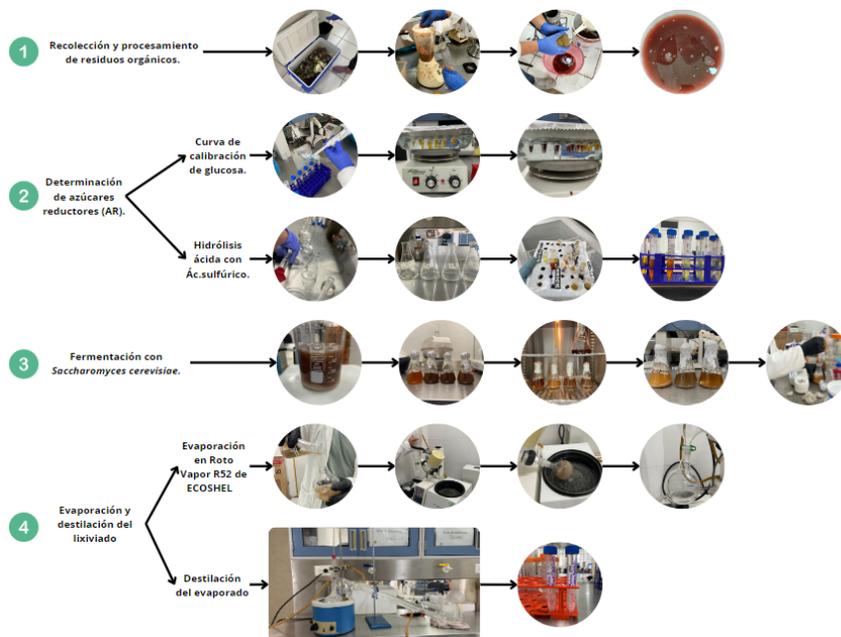
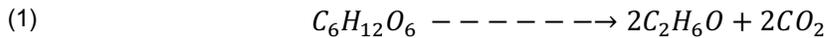


Figura 1. Metodología general.

Resultados y discusión

La primera colecta de RSU realizada el 17 de junio del 2024 se reunieron mayor cantidad de residuos vegetales, por lo tanto, el lixiviado proveniente de este tipo de residuos fue más hediondo y difícil de obtener. Mientras que la segunda colecta (03 de julio del 2024) se reunió mayor cantidad de residuos frutales, por lo tanto, sus características fueron olor dulce, coloración marrón-rojizo. Para la curva de calibración se analizaron concentraciones de la solución de dextrosa anhidra al espectrofotómetro UV a una longitud de 540 nm para medir su absorbancia, Figura 2.

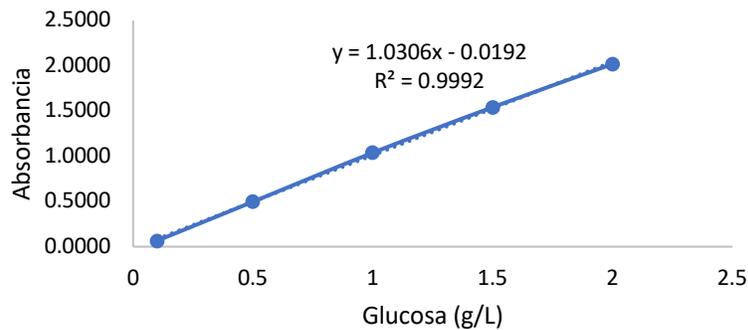


Figura 2: Curva de calibración de glucosa de 0.1 - 2.0 gL⁻¹.

En la tabla 1 se muestra los resultados obtenidos en la determinación de AR del lixiviado. Al analizar el contenido de glucosa, se determinó que el lixiviado hidrolizado con el 1% es el que contiene mayor concentración de glucosa en su composición, mientras que por arriba del 2% disminuye considerablemente, debido posiblemente a la descomposición o degradación de los monosacáridos (Ferrer et al., 2002).

Tabla 1. Glucosa de lixiviado fresco e hidrolizado a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico (Viales HACH - DR3900).

Lix Fresco	-----	0.044± 0.01
Lixiviado 1	1 %	4.470± 0.07
Lixiviado 2	2%	0.641± 0.03
Lixiviado 3	4%	0.185± 0.11
Lixiviado 4	8%	0.173± 0.10
Lixiviado 5	16%	0.152± 0.02

En la figura 3 se observa la cepa de *S.cerevisiae* que fue utilizada para llevar a cabo el proceso de fermentación.

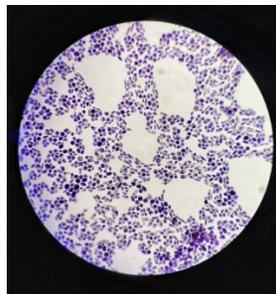


Figura 3. Cepa de *S.cerevisiae*, otorgada por el grupo de trabajo de la Dra. Carmen Cano del Departamento de Biología de la Universidad de Guanajuato.

En la tabla 2 se describen las relaciones de volumen de alcohol por concentración de sacarosa después de la fermentación por cada solución de lixiviado fermentado. Además, se calculó la concentración de monosacáridos presentes en cada una de las muestras, para así obtener las cifras del etanol teórico.

Tabla 2. Concentración de monosacáridos y de etanol teórico.

Muestra	Monosacáridos	Etanol teórico (g)
Lixiviado enriquecidos	17.5 ±0.01	8.7
Lixiviado sin enriquecer	7.3±0.01	3.65
Medio YPG c/inóculo)	2±0.01	1

En adición, el %v/v y los grados Brix nos proporcionan una referencia teórica para saber cuánto etanol deberíamos obtener después de la destilación. Estas mediciones se realizaron con los lixiviados en crudo, enriquecido y una solución de sacarosa, esta última para tener una referencia propia del potencial del alcohol (%v/v). Además, se realizó una calibración con solución de sacarosa para tener un dato de referencia confiable (por cada 14.7 %v/v se tienen 25% Brix, (Ramírez et al., 2009)). Al finalizar la evaporación realizada en el Roto Vapor R52 se obtuvieron volúmenes de solución con etanol (tabla 3), debido a la temperatura a la que se evaporó se podría encontrar la presencia de otros compuestos orgánicos no deseados y agua. Para la cuantificación de etanol mediante cromatografía de gases, se obtuvo una curva de calibración de R^2 0.9999 (figura 4). Se calculó la masa del etanol obtenido y el rendimiento (%) del etanol real con relación al teórico.

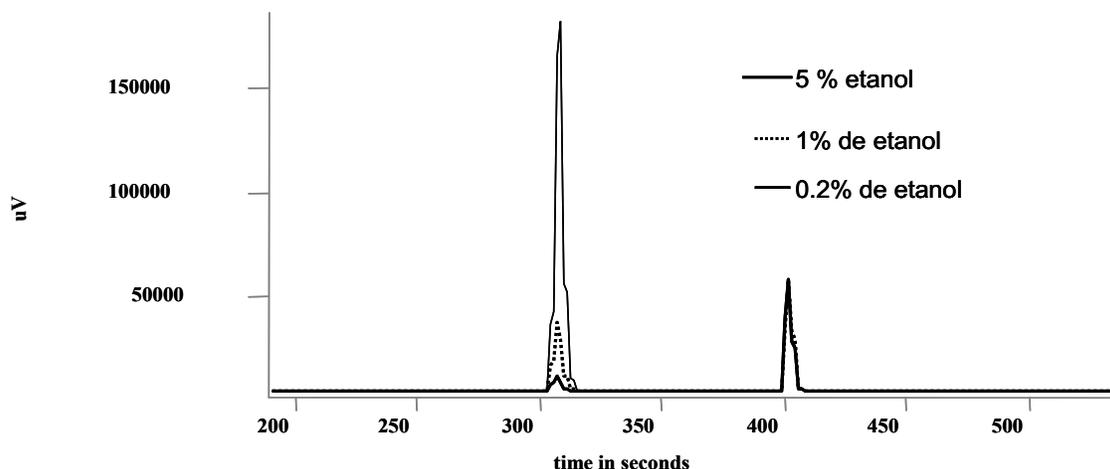


Figura 4. Cromatogramas de curva de calibración para etanol, R^2 0.99995, precisión de 0.138%.

En la tabla 3 se puede observar que hubo mayor concentración de etanol en la muestra de la fermentación procedente en lixiviado enriquecido, al igual que un mayor rendimiento. Sin embargo, es de notar la importancia del porcentaje en el rendimiento de etanol obtenido proveniente de la fermentación del lixiviado sin enriquecer (54%), lo que contribuye como un bioproducto de potencial a considerar en el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos urbanos (FORSU) dentro del esquema integrado de economía circular dentro de la diversidad de bioproductos en las diferentes cadenas productivas teniendo como materia prima los FORSU.

Tabla 3. Etanol obtenido, masa del etanol y rendimiento (%) del etanol obtenido.

Muestra	Rendimiento de obtención de Bioetanol (%)
Lixiviado sin enriquecer	54.10 ± 0.15
Lixiviado enriquecido	82.19 ± 0.88

Conclusión

En el presente trabajo se observó que el lixiviado frutal fresco podría no ser hidrolizado, ya que este mismo contiene bastantes monosacáridos aptos para que la levadura *S. cerevisiae* pueda fermentarlos y obtener bioetanol. El lixiviado crudo (sin enriquecimiento de azúcares) presentó un rendimiento óptimo de etanol. Por lo tanto, es viable para la producción de bioetanol, teniendo en cuenta el aumento de concentración de monosacáridos del lixiviado. Y se puede considerar una alternativa para reducir el impacto ambiental originado de los combustibles fósiles y de un mal manejo de RSU; además, de que se puede implementar bajo el esquema de una economía circular, siendo una perspectiva futura de alternativa energética. Además, este trabajo contribuye en la posibilidad de a través de una tecnología asequible y sustentable que pudiera implementarse en comunidades rurales para satisfacer sus necesidades energéticas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el valioso apoyo del Comité Organizador de los Veranos UG 2024, a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado de la Universidad de Guanajuato (DAIP-UG). A los estudiantes del Posgrado de Ciencia y Tecnología del Agua de la UG, M.C Hugo López Alvarado, Q.F.B Alonso Ismael Bernal Cantero; al Dr. Ulises Emiliano Rodríguez Castrejón (DICG-UG), a la Dra. Carmen Cano Canchola y al Profesor M.C. Aurelio Alvarez Vargas (DCNyE de la UG).

Referencias

- Agrawal, R., Bhagia, S., Satlewal, A., & Ragauskas, A. J. (2023). Urban mining from biomass, brine, sewage sludge, phosphogypsum and e-waste for reducing the environmental pollution: Current status of availability, potential, and technologies with a focus on LCA and TEA. *Environ Res*, 224, 115523. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115523>
- Ayala, J. R., Montero, G., Coronado, M. A., García, C., Curiel-Alvarez, M. A., León, J. A.,...Montes, D. G. (2021). Characterization of Orange Peel Waste and Valorization to Obtain Reducing Sugars. *Molecules*, 26(5). <https://doi.org/10.3390/molecules26051348>
- Bonilla-Hermosa, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. *Bioresour Technol*, 166, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031>
- Chaudhary, A., Akram, A. M., Aihetasham, A., Hussain, Z., Abbas, A. S., Rehman, R. A.,...Sayed, S. (2021). waste to ethanol valorisation employing optimized levels of saccharification and fermentation. *Saudi J Biol Sci*, 28(7), 3710-3719. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.049>
- Chaudhary, A., Hussain, Z., Aihetasham, A., El-Sharnouby, M., Abdul Rehman, R., Azmat Ullah Khan, M.,...Qamer, S. (2021). Pomegranate peels waste hydrolyzate optimization by Response Surface Methodology for Bioethanol production. *Saudi J Biol Sci*, 28(9), 4867-4875. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.081>
- Ferrer, J. R., Páez, G., Arenas de Moreno, L., Chandler, C., Mármol, Z., & Sandoval, L. (2002). Cinética de la hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19(1), 23-33.
- González-Contreras, M., Hernández-Escoto, H., & Aguilar-Garnica, E. (2023). A comprehensive analysis of bioethanol and ethyl lactate joint production in second-generation biorefinery: Simulation, techno-economic, and profitability assessments. *Bioresour Technol*, 385, 129470. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129470>
- González-Gloria, K. D., Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., Shiva, Kostas, E. T., Aparicio, E.,...Ruiz, H. A. (2023). Scale-up of hydrothermal processing: Liquid hot water and pilot-scale tubular steam explosion batch reactor for bioethanol production using macroalgae *Sargassum* spp biomass. *Bioresour Technol*, 369, 128448. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128448>
- JimÉnez Islas, D., Abreu Corona, A., LÓPez Y LÓPez, V. E., Tellez Jurado, A., & Gracida Rodríguez, J. N. (2012). Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de Beta vulgaris L. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 151-158.

- Kotarska, K., Dziemianowicz, W., & Świerczyńska, A. (2019). Study on the Sequential Combination of Bioethanol and Biogas Production from Corn Straw. *Molecules*, 24(24). <https://doi.org/10.3390/molecules24244558>
- Kumar, V., & Verma, P. (2024). Pulp-paper industry sludge waste biorefinery for sustainable energy and value-added products development: A systematic valorization towards waste management. *J Environ Manage*, 352, 120052. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120052>
- Li, J., Li, L., Suvarna, M., Pan, L., Tabatabaei, M., Ok, Y. S., & Wang, X. (2022). Wet wastes to bioenergy and biochar: A critical review with future perspectives. *Sci Total Environ*, 817, 152921. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152921>
- Ma, H., Wei, Y., Fei, F., Gao, M., & Wang, Q. (2024). Whether biorefinery is a promising way to support waste source separation? From the life cycle perspective. *Sci Total Environ*, 912, 168731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168731>
- Manikandan, S., Vickram, S., Sirohi, R., Subbaiya, R., Krishnan, R. Y., Karmegam, N.,...Awasthi, M. K. (2023). Critical review of biochemical pathways to transformation of waste and biomass into bioenergy. *Bioresour Technol*, 372, 128679. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128679>
- Marques, G. L., & Aguiar-Oliveira, E. (2020). Yellow mombin and jackfruit seeds residues applied in the production of reducing sugars by a crude multi-enzymatic extract produced by *Penicillium roqueforti* ATCC 101110. *J Sci Food Agric*, 100(8), 3428-3434. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10377>
- Mehmood, M. A., Iqbal, H. M. N., Bilal, M., & Ferreira, L. F. R. (2022). Special issue: Bioprospecting of microalgae and cyanobacteria for biopharma industries. *J Basic Microbiol*, 62(9), 997-998. <https://doi.org/10.1002/jobm.202200416>
- Mukhtar, H., Mumtaz, M. W., & Massa, S. (2022). Editorial: Waste to Energy: Biomass-Based Energy Systems. *Front Bioeng Biotechnol*, 10, 932981. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.932981>
- Ortega, M. F., Donoso, D., Bousbaa, H., Bolonio, D., Ballesteros, R., García-Martínez, M. J.,...Canoira, L. (2021). Optimized Production of Fatty Acid Ethyl Esters (FAEE) from Waste Frying Oil by Response Surface Methodology. *Waste Biomass Valorization*, 12(5), 2303-2310. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01149-4>
- Perez-Pimienta, J. A., Sathitsuksanoh, N., Thompson, V. S., Tran, K., Ponce-Noyola, T., Stavila, V.,...Simmons, B. A. (2017). Ternary ionic liquid-water pretreatment systems of an agave bagasse and municipal solid waste blend. *Biotechnol Biofuels*, 10, 72. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0758-4>
- Ramírez, C., Pérez, Y., Kafarov, V., Barajas, C., & Castillo, E. (2009). relación entre los azúcares reductores totales (art), grados brix y el contenido de sacarosa en mezclas de alimentación a destilerías en la producción dual azúcar-bioetanol en colombia. *Revista ION*, 22(1), 25-34.
- Serafín Muñoz, A. H., Molina Guerrero, C. E., Gutierrez Ortega, N. L., Leal Vaca, J. C., Alvarez Vargas, A., & Cano Canchola, C. (2019). Characterization and integrated process of pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn straw. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 1857-1871.
- Sindhu, R., Manju, A., Mohan, P., Rajesh, R. O., Madhavan, A., Arun, K. B.,...Reshmy, R. (2020). Valorization of food and kitchen waste: An integrated strategy adopted for the production of poly-3-hydroxybutyrate, bioethanol, pectinase and 2, 3-butanediol. *Bioresour Technol*, 310, 123515. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123515>
- Sánchez, M., Laca, A., & Díaz, M. (2023). Towards food circular economy: hydrothermal treatment of mixed vegetable and fruit wastes to obtain fermentable sugars and bioactive compounds. *Environ Sci Pollut Res Int*, 30(2), 3901-3917. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22486-y>
- Valdez Castillo, M., Laxman Pachapur, V., Brar, S. K., Naghdi, M., Arriaga, S., & Ávalos Ramirez, A. (2020). Yeast-driven whey biorefining to produce value-added aroma, flavor, and antioxidant compounds: technologies, challenges, and alternatives. *Crit Rev Biotechnol*, 40(7), 930-950. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1792407>
- Velvizhi, G., Shanthakumar, S., Das, B., Pugazhendhi, A., Priya, T. S., Ashok, B.,...Karthick, C. (2020). Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy. *Sci Total Environ*, 731, 138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>
- Venkata Mohan, S., Nikhil, G. N., Chiranjeevi, P., Nagendranatha Reddy, C., Rohit, M. V., Kumar, A. N., & Sarkar, O. (2016). Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. *Bioresour Technol*, 215, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.130>
- Zabed, H. M., Akter, S., Rupani, P. F., Akor, J., Zhang, Y., Zhao, M.,...Qi, X. (2023). Biocatalytic gateway to convert glycerol into 3-hydroxypropionic acid in waste-based biorefineries: Fundamentals, limitations, and potential research strategies. *Biotechnol Adv*, 62, 108075. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.108075>