

IMPORTANCIA EN LA COPRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y ÁCIDO CÍTRICO EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

Karla Lucia Flores Servín ^a, Karol Antonio Alcantar Moncada ^a, Ana Lucia Guerrero Villalobos ^a, Erik Eduardo Rodríguez Hernández ^a, Eric Orlando Martínez Márquez ^a, Guillermo Manuel González Guerra ^{b,c*}, Fernando Israel Gómez Castro ^c, Salvador Hernández Castro ^c, Zeferino Gamiño Arroyo ^c

^a División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Cerro de la Venada S/N, Guanajuato, Guanajuato, 36040, MÉXICO. Correo: gm.gonzalezguerra@ugto.mx

^b SECIHTI, Avenida Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Ciudad de México, 03940, MÉXICO.

^c Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, MÉXICO

Resumen

La creciente generación de residuos agroalimentarios representa un reto ambiental y económico significativo. Estos desechos, ricos en compuestos lignocelulósicos y azúcares fermentables, permiten direccionar esfuerzos hacia la economía circular para la producción de bioproductos de alto valor agregado. En este trabajo se evaluó el potencial de residuos locales de piña (*Ananas comosus*), granada (*Punica granatum*), mango (*Mangifera indica*), zanahoria (*Daucus carota*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) para la coproducción de bioetanol y ácido cítrico mediante procesos biotecnológicos diferenciados.

La metodología del proceso de conversión consistió en el secado y posterior hidrólisis ácida para liberar azúcares fermentables. Para la obtención de ácido cítrico se utilizó *Aspergillus niger* bajo condiciones aeróbicas controladas, mientras que para el bioetanol se empleó *Saccharomyces cerevisiae* en condiciones anaerobias. Adicionalmente se realizó la caracterización cinética de la formación de productos, por medio de refractometría (°Brix) y espectroscopía UV-Vis.

De los productos obtenidos, se observó una disminución progresiva de azúcares reductores durante la fermentación, confirmando la conversión de bioetanol y ácido cítrico. Las mezclas con mayor proporción de granada presentaron mayor disponibilidad de azúcares y una conversión más eficiente. El presente trabajo demuestra la viabilidad de integrar rutas fermentativas para valorizar residuos agroindustriales, promoviendo la sostenibilidad y el desarrollo de tecnologías limpias regionalmente adaptadas, con impacto directo en la seguridad energética y la reducción de impactos ambientales.

Palabras clave: Bioetanol; Ácido cítrico; Residuos agroalimentarios; Biorrefinería; Economía circular.

IMPORTANCE OF THE CO-PRODUCTION OF BIOETANOL AND CITRIC ACID FOR THE CIRCULAR ECONOMY

Abstract

The increasing generation of agri-food waste represents a significant environmental and economic challenge. These residues, rich in lignocellulosic compounds and fermentable sugars, lead to open opportunities for contributing the circular economy through the production of high value-added bioproducts. In this study, the potential of local residues from pineapple (*Ananas comosus*), pomegranate (*Punica granatum*), mango (*Mangifera indica*), carrot (*Daucus carota*), and broccoli (*Brassica oleracea var. italica*) were evaluated for the co-production of bioethanol and citric acid through differentiated biotechnological processes.

The methodology for the desired conversion started with drying the residues, followed by acid hydrolysis to release fermentable sugars. Citric acid production was carried out using *Aspergillus niger* under controlled aerobic conditions, while *Saccharomyces cerevisiae* was employed for bioethanol production under anaerobic conditions. Additionally, the kinetic characterization of product formation was performed through refractometry (°Brix) and UV-Vis spectroscopy.

The results obtained revealed a progressive decrease in reducing sugars during fermentation, confirming the conversion to bioethanol and citric acid. The mixtures with higher proportions of pomegranate exhibited greater sugar availability and more efficient conversion. This study demonstrates the feasibility of integrating fermentative routes to valorize agro-industrial residues,

promoting sustainability and the development of regionally adapted clean technologies, with direct implications for energy security and the reduction of environmental impacts.

Keywords: Bioethanol; Citric acid; Agri-food residues; Biorefinery; Circular economy.

1. Introducción

La constante generación de residuos representa un gran reto ambiental y económico a nivel global. Podemos destacar el desperdicio de biomasa, particularmente de frutas y vegetales, que ha alcanzado cifras alarmantes, impactando de manera directa en la gestión sostenible de recursos y en la estabilidad de los ecosistemas (United Nations Environment Programme, 2024).

Este fenómeno se puede visualizar en la figura 1 donde se remarcan los países con mayor generación de desperdicios vegetales dentro de las cadenas de suministro. Destacan

significativamente naciones como China (57.9 millones de toneladas), India (12.6 millones de toneladas), Estados Unidos (2.7 millones de toneladas) y Turquía (5.2 millones de toneladas), cuyas economías agrícolas intensivas generan grandes volúmenes de biomasa residual debido a prácticas ineficientes de cosecha, manejo postcosecha, transporte y almacenamiento (FAO, 2023; United Nations Environment Programme, 2024). En países como México, se reporta una producción de más de 9,500 toneladas diarias de residuos orgánicos solo en el estado de Guanajuato (Gomez Castro y col., 2022).

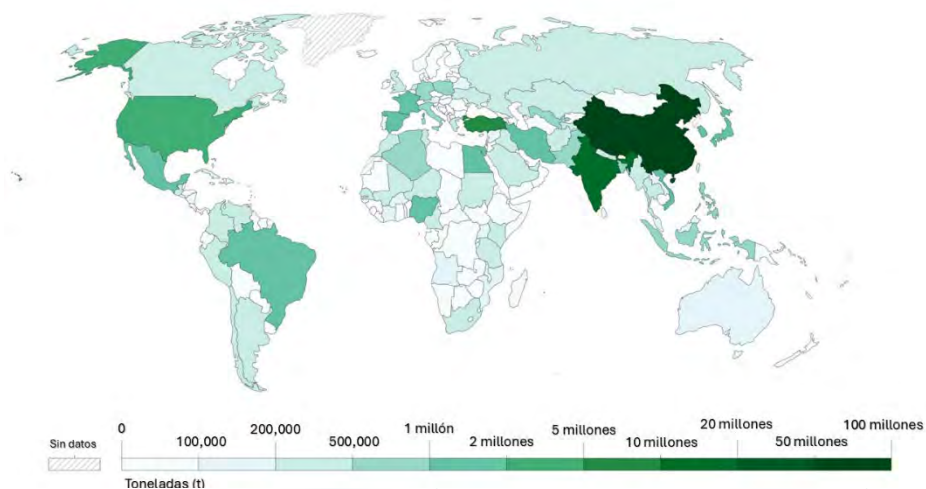


Figura 1. Generación mundial de residuos vegetales agroindustriales por país.

Tradicionalmente, los residuos vegetales son gestionados a través de prácticas como la disposición en rellenos sanitarios o la incineración, procesos que generan gases de efecto invernadero, lixiviados tóxicos y pérdida de recursos potencialmente reutilizables (De Anda-Trasviña y col., 2021).

En respuesta a esta problemática, la economía circular surge como una estrategia integral para reconvertir estos desechos en productos de valor agregado, favoreciendo la sostenibilidad, la seguridad energética y la innovación industrial (United Nations Environment Programme, 2025).

En este contexto, se ha intensificado la investigación y aplicación de biotecnologías

enfocadas en la transformación de residuos agroalimentarios en compuestos bioactivos.

El auge en la producción de estos productos con valor agregado ha reflejado el interés global para impulsar tecnologías más limpias. Como se observa en la figura 2, la producción mundial de biocombustibles ha registrado un incremento constante desde 1990, año en el

que se generaban apenas 86.6 TWh de capacidad de energía producida gracias a biocombustibles, hasta alcanzar un máximo histórico de 1,424.5 TWh en 2024. Este crecimiento acelerado, especialmente marcado a partir de la década del 2000, evidencia una el creciente interés en torno a las energías renovables (Energy Institute, 2025).

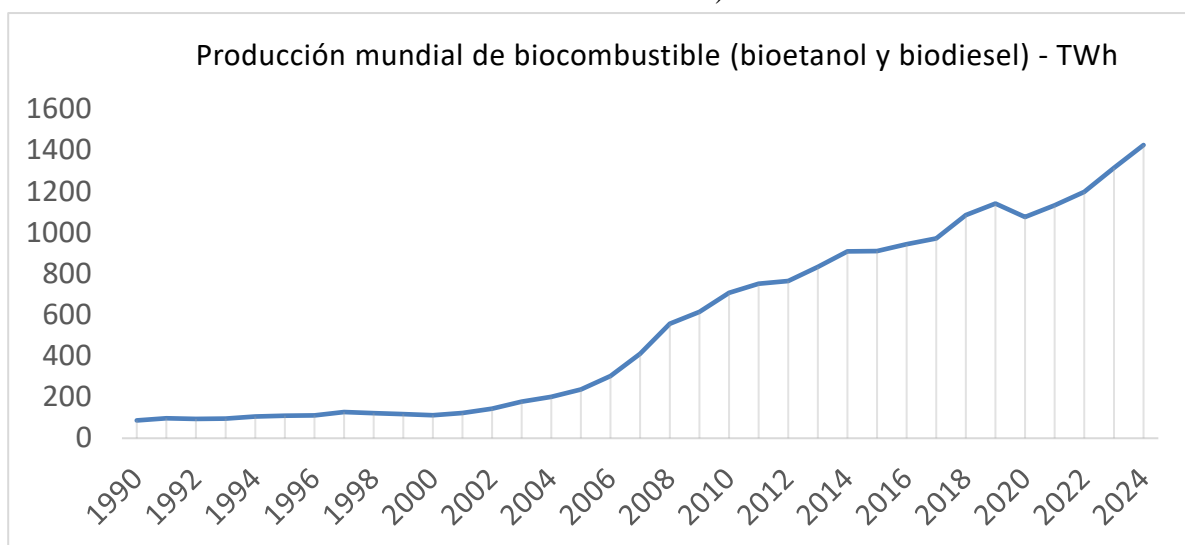
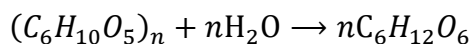


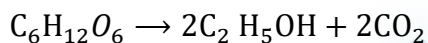
Figura 2. Producción de energía con biocombustibles, 2024.

La producción de bioetanol y ácido cítrico son posibles gracias a la composición de los residuos vegetales. Esta biomasa está compuesta principalmente por tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya proporción relativa puede alcanzar entre el 85 % y 95 % de la materia seca (Fajobi y col., 2022).

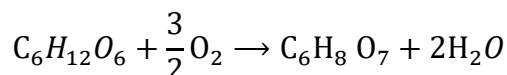
La celulosa, un polímero lineal de β -(1,4)-glucano con un grado de polimerización que varía entre 300 y 15,000 unidades, constituye la fracción más abundante, representando entre el 35 % y el 50 % de la biomasa. Su estructura es altamente ordenada lo que permite mediante procesos de hidrólisis ácida o enzimática la liberación de azúcares fermentables esenciales para la producción de bioetanol y ácidos orgánicos como el ácido cítrico como se puede observar en la siguiente ecuación:



Posteriormente, estos monosacáridos se pueden transformar en productos de interés mediante rutas metabólicas específicas. En condiciones anaerobias, la glucosa es convertida en etanol y dióxido de carbono por *Saccharomyces cerevisiae*:



En la ruta del ácido cítrico, empleamos el hongo *Aspergillus niger*. Bajo condiciones de limitación de nutrientes y ambiente anaeróbico, la glucosa se oxida parcialmente. Podemos ilustrar el proceso general de oxidación parcial la siguiente ecuación:



Si bien ambos productos derivan de los mismos precursores azucarados, su síntesis ocurre de forma independiente y requiere estrategias diferenciadas en el diseño del bioproceso (González-Guerra y col., 2024; Książek, 2023; Ragauskas y col., 2006)).

Con base en estos principios, nuestro grupo de investigación ha trabajado un enfoque experimental para el aprovechamiento de residuos orgánicos locales para su valorización biotecnológica. En particular, se trabajó con residuos de piña (*Ananas comosus*), granada (*Punica granatum*), mango (*Mangifera indica*), zanahoria (*Daucus carota*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), seleccionados por su alto contenido de azúcares fermentables. Se ha evaluado su potencial en la producción de bioetanol y ácido cítrico mediante los procesos fermentativos respectivos. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de

Almacenamiento y Conversión de Energía de la Universidad de Guanajuato, empleando técnicas analíticas como espectroscopía UV-

Vis y cromatografía para la caracterización y cuantificación de los productos obtenidos.

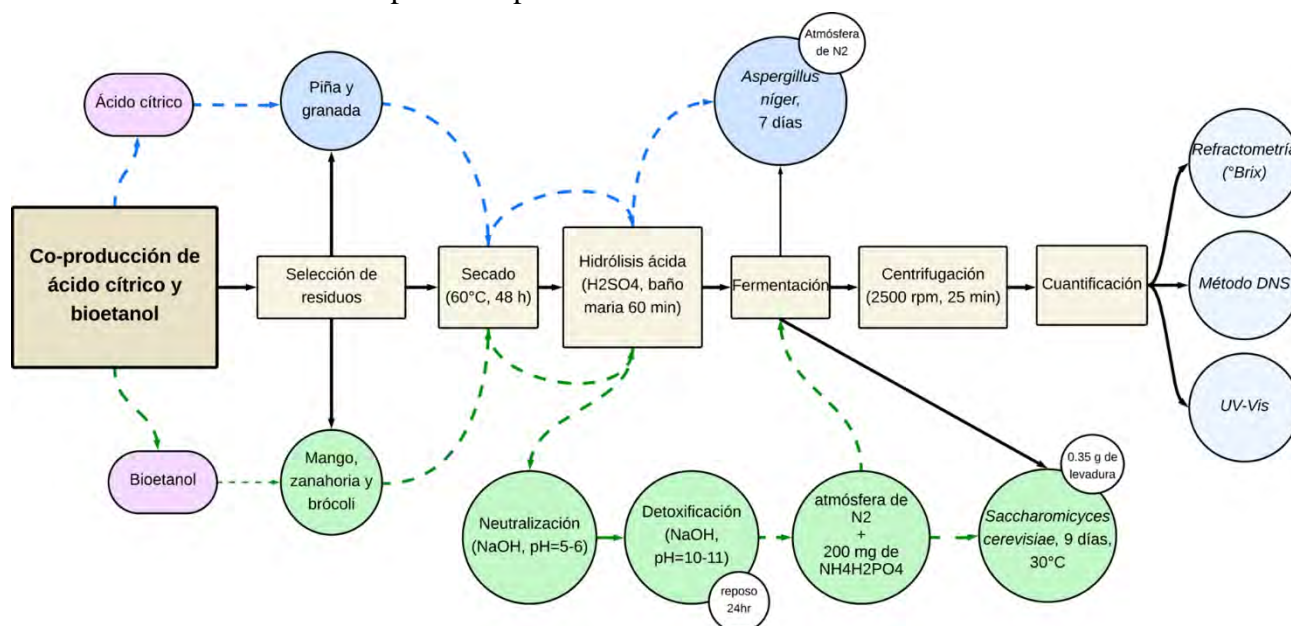


Figura 3. Diagrama del proceso de coproducción de ácido cítrico y bioetanol llevado a cabo.

2. Metodología experimental

2.1. Materia prima y pretratamiento común

Para el desarrollo experimental se utilizaron residuos agroalimentarios clasificados según su aplicación esperada: la piña y la granada se destinaron para la producción de ácido cítrico, mientras que, para el bioetanol se utilizó piña, mango, brócoli, zanahoria y granada, y se monitoreó la síntesis de 24g en proporción 1:1:1:1:1 y 1:1:1:1:5.

Los residuos fueron sometidos a un proceso de secado a 60 °C durante 48 horas, y posteriormente tratados mediante hidrólisis

ácida con H₂SO₄ diluido en baño maría (60 minutos) para liberar los azúcares fermentables.

2.2. Producción de ácido cítrico

Una vez realizada la hidrólisis, las muestras destinadas a ácido cítrico fueron inoculadas con conidias de *Aspergillus niger* (cepa A732) en medio acuoso. La fermentación se llevó a cabo durante 7 días, en atmósfera de nitrógeno para favorecer condiciones aeróbicas controladas y maximizar la producción de este ácido orgánico.

2.3. Producción de bioetanol

En el caso del bioetanol, tras la hidrólisis se aplicó un proceso de neutralización con NaOH 3M hasta alcanzar un pH de 5–6, seguido de una detoxificación alcalina con NaOH adicional para llevar el pH a 10–11.

La fermentación se realizó durante 9 días a 30 °C en atmósfera de nitrógeno, utilizando 0.35 g de *Saccharomyces cerevisiae* como microorganismo fermentador y adicionando 200 mg $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ como fuente de fósforo y nitrógeno.

2.4 Obtención y caracterización del producto

Una vez finalizadas ambas fermentaciones, se separó el residuo sólido para conservar la parte líquida y proceder a caracterizarlas. Las muestras también se sometieron a centrifugación (2500 rpm, 25 min) y su evaluación incluyó:

- Lecturas por refractometría (°Brix).
- Metodología DNS \rightarrow UV-Vis.

Estos procesos se llevaron a cabo para poder evaluar la viabilidad de la conversión. Resulta indispensable conocer el contenido de azúcares fermentables disponibles durante el tratamiento de la biomasa. Estos azúcares representan el sustrato principal para los microorganismos utilizados, por lo que su cuantificación permite estimar el rendimiento potencial de productos como el bioetanol y el ácido cítrico.

La medición por °Brix proporciona una aproximación rápida del contenido de sólidos solubles, mientras que el análisis espectrofotométrico (UV-Vis) permite una cuantificación más específica de los azúcares reductores en solución. Esta caracterización no solo valida la eficiencia de la hidrólisis, sino que también proporciona información clave sobre la disponibilidad de nutrientes y el

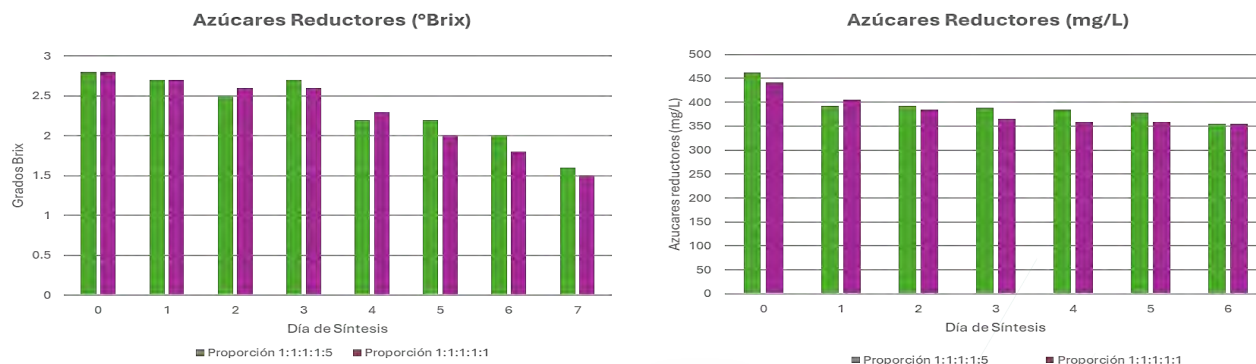


Figura 4. Evolución de azúcares reductores durante la síntesis de bioetanol. a) Variación de sólidos solubles (°Brix), b) Cuantificación de azúcares reductores por espectroscopía UV-Vis (mg/L).

comportamiento metabólico de los cultivos microbianos durante la fermentación (Alvira y col., 2010; Koutinas y col., 2014).

3. Resultados y discusión

3.1. Producción de bioetanol

Según los resultados obtenidos de azúcares reductores presentados en °Brix (Figura 4a), ambas proporciones de síntesis mostraron una tendencia descendente a lo largo del proceso de fermentación, lo cual indica que existe un consumo progresivo de sólidos solubles objetivo. La mezcla con mayor contenido de granada (1:1:1:1:5) sí presentó valores ligeramente superiores en la mayoría de los días, comenzando en 2.8 °Brix y descendiendo hasta 1.6 al día 7, mientras que

la proporción 1:1:1:1:1 alcanzó 1.5 °Brix. Esta diferencia sugiere una mayor disponibilidad inicial de azúcares en la mezcla enriquecida con granada.

De forma complementaria, el análisis UV-Vis (Figura 4b) permitió confirmar la tendencia de azúcares reductores, que en la proporción 1:1:1:1:5 pasó de 462 mg/L a 355 mg/L, mientras que en la proporción 1:1:1:1:1 la disminución fue de 442 mg/L a 355.33 mg/L. Aunque ambas proporciones convergen al final del proceso, el consumo mostró una tendencia más uniforme durante la fermentación en la mezcla con mayor contenido de granada. Esto refuerza la hipótesis de que un mayor aporte de materia

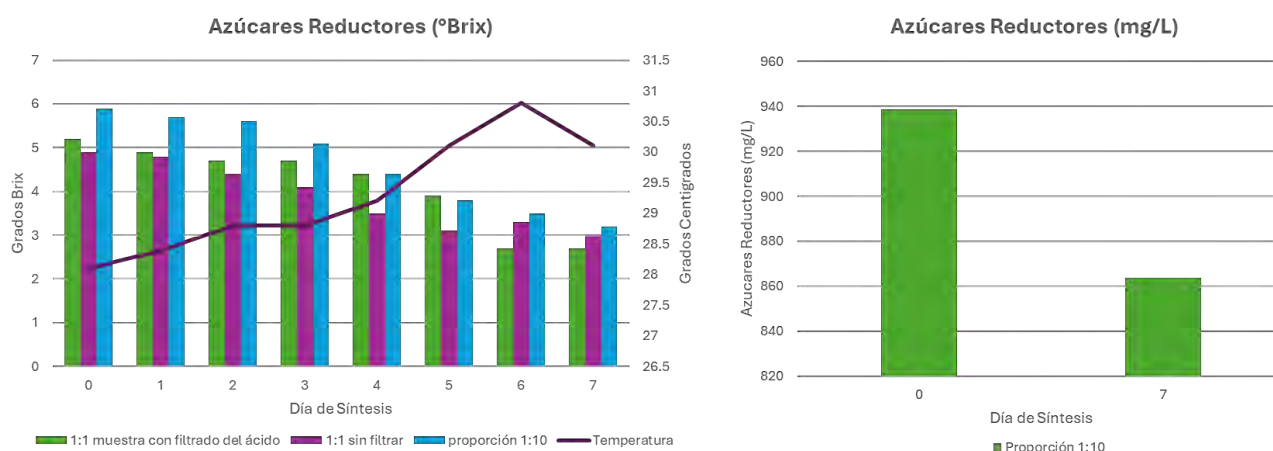


Figura 5. Evolución de azúcares reductores durante la síntesis de ácido cítrico. a) Variación de sólidos solubles (°Brix) durante 7 días de fermentación. b) Cuantificación de azúcares reductores mediante UV-Vis (mg/L) al día 0 y día 7.

rica en azúcares favorece la eficiencia fermentativa.

3.2. Producción de ácido cítrico

Para analizar la producción de ácido cítrico, podemos observar en la Figura 5a) que los valores de °Brix muestran una disminución general de los sólidos solubles durante los 7 días de fermentación en las tres condiciones evaluadas. La mezcla con proporción 1:10 presentó la mayor caída, pasando de 5.9 a 3.2 °Brix, lo que indica una mayor conversión de azúcares. En las mezclas 1:1, la muestra con filtrado previo del ácido mostró mayor eficiencia en la reducción de sólidos solubles (de 5.2 a 2.7 °Brix), en comparación con la muestra sin filtrar (de 4.9 a 3.0 °Brix), lo que sugiere que la eliminación de sólidos pudo favorecer la biodisponibilidad del sustrato.

Por otro lado, el análisis por UV-Vis (Figura 5b) permitió observar, al igual que con el bioetanol, una tendencia negativa en la concentración de azúcares reductores desde 938.66 mg/L hasta 863.66 mg/L en la mezcla 1:10. Aunque la reducción no fue tan marcada como en los valores refractométricos, estos resultados nos confirman que *Aspergillus niger* logró una conversión parcial de los azúcares disponibles bajo las condiciones de fermentación establecidas. La temperatura se

mantuvo dentro de un rango adecuado (28.1 °C–30.8 °C), lo que también pudo contribuir a la eficiencia del proceso.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman el gran potencial de los residuos agroalimentarios como materia prima para la producción simultánea de bioetanol y ácido cítrico, y así mismo, destaca su relevancia con los principios de la economía circular.

Las mezclas enriquecidas con granada mostraron mayor conversión de azúcares en ambos procesos, destacando su relevancia como sustrato fermentable, de igual forma, el pretratamiento por filtrado y la proporción adecuada de biomasa fueron determinantes para optimizar la disponibilidad de nutrientes y mejorar el rendimiento fermentativo.

Esto demuestra la viabilidad biotecnológica para integrar rutas de síntesis diferenciadas que permitan la coproducción de compuestos de alto valor añadido a partir de desechos locales. Este enfoque no solo promueve una gestión más sostenible de los residuos, sino que también se abre a oportunidades para el desarrollo de tecnologías limpias, descentralizadas y adaptadas al contexto regional.

Referencias bibliográficas

- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851–4861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
- De Anda-Trasviña, A., García-Galindo, E., Peña-Castañón, A., Seminario-Peña, J., & Nieto-Garibay, A. (2021). Residuos orgánicos: ¿basura o recurso? . *Recursos Naturales y Sociedad*, 7(3), 19–42. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004>
- Energy Institute. (2025). *Statistical Review of World Energy: Biofuels production*. <https://archive.ourworldindata.org/20250909-093708/grapher/biofuel-production.html>
- Fajobi, M. O., Lasode, O. A., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., & Balogun, A. O. (2022). Investigation of physicochemical characteristics of selected lignocellulose biomass. *Scientific Reports*, 12(1), 2918. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07061-2>
- FAO. (2023). *FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/faostat>
- Gomez Castro, F. I., González-Guerra, G. M., Restrepo-Elorza, M. del P., Montiel-Carrillo, A. P., Álvarez-Rivera, K. Y., Linares-Luna, R. G., & Hernández, S. (2022). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: potencial en el estado de Guanajuato. *Digital Ciencia@UAQRO*, 15(1). <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/issue/view/72>
- González-Guerra, G. M., Garate Ruiz, J. R., Santos Tanamachi, K., Restrepo-Elorza, M. del P., Gómez-Castro, F. I., Hernández, S., García-García, J. C., & Gamiño-Arroyo, Z. (2024). Synthesis of bioethanol from mixed vegetable wastes: Experimental methodology and characterization. *Engineering Reports*, 6(7). <https://doi.org/10.1002/eng2.12784>
- Koutinas, A. A., Vlysidis, A., Pleissner, D., Kopsahelis, N., Lopez Garcia, I., Kookos, I. K., Papanikolaou, S., Kwan, T. H., & Lin, C. S. K. (2014). Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers. *Chemical Society Reviews*, 43(8), 2587. <https://doi.org/10.1039/c3cs60293a>
- Książek, E. (2023). Citric Acid: Properties, Microbial Production, and Applications in

Industries. *Molecules*, 29(1), 22.
<https://doi.org/10.3390/molecules29010022>

Ragauskas, A. J., Williams, C. K., Davison, B. H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C. A., Frederick, W. J., Hallett, J. P., Leak, D. J., Liotta, C. L., Mielenz, J. R., Murphy, R., Templer, R., & Tschaplinski, T. (2006). The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science*, 311(5760), 484–489.
<https://doi.org/10.1126/science.1114736>

United Nations Environment Programme. (2024). *Food Waste Index Report 2024. Think Eat Save: Tracking Progress to Halve Global Food Waste*.
<https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>

United Nations Environment Programme. (2025). *We are all in this together - Annual Report 2024*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47082>.