

# PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DE AGROINDUSTRIALES CON POTENCIAL USO COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO

PRODUCTION OF BIOETHANOL FROM AGROINDUSTRIAL WASTE WITH POTENTIAL USE AS SOLID FUEL

Cabrera Castillo Rodrigo Antonio\* (1)  
Vidal Robles Esmeralda (2)  
Bañuelos Romero Fortino (1)

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 277 - 285

**RD-ICUAP**

<https://orcid.org/0009-0003-3858-0071>  
<https://orcid.org/0000-0002-8049-7648>  
<https://orcid.org/0000-0001-8143-0878>

Año 11 No. 26  
Recibido: 1/Diciembre/2024  
Aprobado: 2/Enero/2025  
Publicado: 20/Enero/2025

cc223470227@alm.buap.mx  
esmeralda.vidal@correo.buap.mx  
fortino.banuelos@correo.buap.mx

1): Maestría en Ciencias en Energías Renovables ICUAP BUAP  
(2): Facultad de Ingeniería Química BUAP

## Resumen

El presente documento se centra en la investigación y desarrollo de biocombustibles de segunda generación, específicamente bioetanol, utilizando residuos agroindustriales como las coronas de piña. Ante la creciente preocupación por el medio ambiente y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, esta investigación propone una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. El estudio aborda el proceso de producción de bioetanol mediante la fermentación de azúcares obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica, que requiere pretratamientos específicos para mejorar la eficiencia del proceso. Se investigan diferentes métodos de hidrólisis (alcalina, ácida y enzimática) para maximizar la extracción de azúcares reductores y posteriormente fermentarlos utilizando microorganismos adecuados como *Saccharomyces cerevisiae*. El objetivo principal es evaluar la producción de etanol a partir de la biomasa lignocelulósica de coronas de piña y comparar el rendimiento de diferentes tratamientos de hidrólisis. Además, busca brindar una solución que convierta los residuos agroindustriales en un producto de valor agregado, reduciendo así la contaminación y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: biocombustibles de segunda generación, bioetanol, coronas de piña, emisiones de gases de efecto invernadero, biomasa lignocelulósica, hidrólisis, alcalina, ácida, enzimática, *Saccharomyces cerevisiae*.

## Abstract

The present document focuses on the research and development of second-generation biofuels, specifically bioethanol, using agro-industrial residues such as pineapple crowns. Given the growing concern for the environment and the need to reduce greenhouse gas emissions, this research proposes a sustainable alternative to fossil fuels. The study addresses the bioethanol production process through the fermentation of sugars obtained from lignocellulosic biomass, which requires specific pretreatments to enhance process efficiency. Different hydrolysis methods (alkaline, acidic, and enzymatic) are investigated to maximize the extraction of reducing sugars and subsequently ferment them using suitable microorganisms such as *Saccharomyces cerevisiae*. The main objective is to evaluate ethanol production from the lignocellulosic biomass of pineapple crowns and compare the yield of different hydrolysis treatments. Additionally, it seeks to provide a solution that converts agro-industrial residues into a value-added product, thereby reducing pollution and contributing to environmental sustainability.

Keywords– second generation biofuels, bioethanol, pineapple crowns, greenhouse gas emissions, lignocellulosic biomass, hydrolysis, alkaline, acidic, enzymatic, *Saccharomyces cerevisiae*.

## Introducción

La investigación presentada aborda la urgente necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los combustibles fósiles debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros residuos ambientales. La investigación se centra en la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, concretamente de la corona de piña, mediante procesos de fermentación de azúcares. Estos procesos requieren pretratamientos específicos para mejorar la eficiencia de la conversión de biomasa en biocombustibles. La investigación tiene como objetivo evaluar y optimizar estos procesos productivos, al tiempo que se busca una solución viable y rentable para gestionar los residuos agroindustriales de manera sostenible.

## Desarrollo

Planteamiento del problema:

El principal problema abordado es la necesidad de encontrar alternativas sostenibles a los combustibles fósiles, dada la creciente preocupación por el cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero [1].

La producción y manejo de residuos agroindustriales, como las coronas de piña, representa un desafío importante [2]. Estos residuos no solo generan contaminación ambiental, sino que también pueden afectar negativamente a la agricultura si no se gestionan adecuadamente [2].

En México, la producción de piña es significativa, ocupando el noveno lugar a nivel mundial [3]. Sin embargo, la gestión de los residuos de la piña, como la corona, es ineficiente y puede causar problemas ambientales y de salud. Estos residuos suelen ser abandonados o quemados, lo que contribuye a la contaminación y afecta al ciclo del cultivo [1].

Por lo tanto, es necesario encontrar la manera de transformar estos desechos

en productos de valor agregado, como el bioetanol, que puede servir como biocombustible de segunda generación.

## Hipótesis

La hipótesis planteada es que es posible obtener etanol a partir de residuos agroindustriales de piña a través de al menos un proceso de hidrólisis. Además, se espera que al establecer unas condiciones óptimas de hidrólisis y fermentación, se pueda obtener la máxima concentración de azúcares reductores y la máxima producción de alcohol.

## Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles son materiales derivados de organismos vivos, como plantas y desechos animales, que se utilizan para la combustión [4].

Entre ellos, el bioetanol se produce a través de la fermentación de azúcares extraídos de la biomasa lignocelulósica, que incluye componentes como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina [5]. Para convertir la biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables, se necesitan pretratamientos que rompan estas estructuras complejas.

Estos tratamientos previos son cruciales, ya que la lignina y la hemicelulosa no tratadas reducen la conversión en azúcares fermentables. Los tratamientos comunes incluyen métodos de hidrólisis alcalina, ácida y enzimática, que liberan azúcares simples como la glucosa y la xilosa, necesarios para la fermentación [6].

## Proceso de fermentación

El proceso de fermentación es llevado a cabo por microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*, que convierten los azúcares en etanol. La eficiencia de este proceso depende de la calidad y cantidad de azúcares liberados durante la hidrólisis y de las condiciones óptimas de fermentación establecidas [7].

## Importancia económica y medioambiental

El desarrollo de bioetanol a partir de residuos agroindustriales no solo ofrece una solución a la gestión de residuos, sino que también proporciona una fuente de energía limpia y renovable. Esto puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ofrecer beneficios económicos al crear productos de valor añadido a partir de los residuos agrícolas. Además, la implementación de biocombustibles puede contribuir significativamente a los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático y promover la sostenibilidad ambiental.

## Metodología

El presente estudio propone someter el material lignocelulósico a un proceso de sacarificación para convertirlo en azúcares fermentables mediante degradación mecánica y química. Para ello, se proponen una serie de etapas, cuyos resultados también se mostrarán a continuación:

### Secado de material lignocelulósico

La materia prima debe secarse a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad de equilibrio del 10% de su peso inicial. Una vez que la muestra ha alcanzado un peso constante, el cálculo de la diferencia entre el peso inicial y el peso final representa la cantidad de humedad que estaba presente en la muestra original. La humedad se calcula como el porcentaje de la masa de agua perdida con respecto a la masa inicial de la muestra:

Tiempo de secado	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% de humedad	Peso post mollienda
11 días	21250 g	2100 g	90.14%	1722 g
14 días	17000 g	1932 g	88.63%	1507.6 g
21 días	23375 g	2884.47 g	87.66%	2480.3 g

Una vez que la muestra ha alcanzado un peso constante, el cálculo de la diferencia entre el peso inicial y el peso final representa la cantidad de humedad que estaba presente en la muestra original. La humedad se calcula como el porcentaje de la masa de agua perdida con respecto a la masa inicial de la muestra:

Tiempo de secado	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% de humedad	Peso post mollienda
11 días	21250 g	2100 g	90.14%	1722 g
14 días	17000 g	1932 g	88.63%	1507.6 g
21 días	23375 g	2884.47 g	87.66%	2480.3 g

## Composición del material lignocelulósico.

Se determinará la composición del material lignocelulósico una vez molido, tanto antes como después de los tratamientos por espectroscopia infrarroja.

### Determinación de lignina

Para determinar la lignina presente en el material lignocelulósico se utilizará la metodología TAPPI 222 om-g8, también conocida como método de Klason.

A continuación, se mostrará el procedimiento para la determinación de lignina. Cabe destacar que este procedimiento se llevará a cabo para la materia prima molida y para la materia prima sometida a los diferentes procesos de hidrólisis.

### Procedimiento:

1. En un matraz Erlenmeyer de 500 ml añadir 1 g de muestra molida, añadir 15 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 40% y agitar constantemente durante 1 minuto.
2. Deje reposar la mezcla durante 1 hora con agitación constante.
3. Diluir la concentración de ácido al 3% añadiendo 200 ml de agua destilada.
4. Hervir con reflujo durante 2 horas y dejar enfriar el matraz hasta que se observe una decantación de material insoluble.
5. Filtre la solución del paso 4 con una bomba de vacío y un embudo Buchner.
6. Lave el precipitado con 200 ml de agua caliente hasta que el material insoluble esté libre de ácido.

7. Secar con papel de filtro y su contenido en una mufla durante 4 horas a 100°C.
8. Determine el % de lignina, con la ayuda de la siguiente fórmula:

Dónde:

Pmh = Peso de la muestra húmeda

Pms= Peso de la muestra seca

Se realizaron varias determinaciones de lignina hasta obtener un estándar de resultados que se mostrará en la Tabla 2, a su vez, se compararán con los resultados de determinación de lignina de las muestras que fueron sometidas a los procesos de hidrólisis ácida y alcalina.

## Hidrólisis alcalina

A continuación, se mostrarán los pasos para someter la muestra de piña molida a hidrólisis alcalina:

1. Prepare 250 ml de una solución de NaOH 0,1N.
2. Pesar 15 g de muestra y añadir la solución de NaOH 0,1N.
3. Deje la solución durante 15 minutos y luego agregue 0,816 g de sulfato de calcio a la solución.
4. Dejar reposar durante 3 horas.
5. Separar las partículas de la solución por filtración.

Al mismo tiempo, se propone una hidrólisis donde después de realizar la hidrólisis alcalina, se somete a hidrólisis ácida, aunque el procedimiento aún no se ha realizado experimentalmente, los pasos se mostrarán a continuación:

Hidrólisis ácida de sólidos a partir de hidrólisis alcalina:

1. Agregue 250 ml de una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% a un matraz Erlenmeyer.
2. Vierta el sólido resultante de la hidrólisis alcalina en un vaso de precipitados de 250 ml y agregue la solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% hasta que el potenciómetro marque pH = 5.
3. Lleve las muestras a un esterilizador de presión de vapor eléctrico (autoclave) manteniendo una presión de 1atm (15 psi) y 125 °C durante 15 minutos.

## Hidrólisis ácida

A continuación, se mostrarán los pasos para enviar las muestras de la materia prima molida.

1. Agregue 250 ml de una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0,1% a un matraz Erlenmeyer y ajuste el pH de la solución a pH = 5.
2. Vierta 15 g de muestra sólida seca en el vaso de precipitados de 250 ml que contiene la solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0,1%.
3. Deje remover la solución con la muestra seca durante 30 minutos.
4. Ajuste el pH de la solución agitada a pH = 5.
5. Lleve las muestras a un esterilizador eléctrico de vapor a presión (autoclave) manteniendo una presión de 1 atm y 125 °C durante 15 minutos.

## Hidrólisis enzimática

Para la hidrólisis enzimática se deben llevar a cabo los siguientes pasos:

1. Por cada muestra resultante de la hidrólisis, pesar 0,25 g de sólidos previamente secados en un tubo falcon de 50 ml.
2. Agregue 30 ml de tampón de fosfato de sodio 0,2M a cada tubo de halcón.
3. Añadir 24 µg de tetraciclina a cada muestra y agitar los tubos durante 30 minutos.
4. Añada 0,45 ml de enzima a cada muestra de tubo de halcón y suméjala en una tina de calentamiento a 50 °C durante 30 minutos.
5. El pH de los tubos se ajusta a 4,9 dentro del evaporador rotativo y los tubos de halcón se dejan en una incubadora a 150 rpm y 50°C de temperatura durante 72 horas.

Es importante mencionar que para cada proceso de hidrólisis a realizar, es recomendable hacerlo por triplicado para optimizar y minimizar los tiempos, así como realizar un mayor número de lecturas posibles al determinar azúcares reductores mediante espectrofotometría. Para ello, en cada proceso de hidrólisis se debe estabilizar el pH en 7 (neutralización) para obtener una lectura fiable.

**Determinación de azúcares reductores**  
Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, los siguientes pasos serán cruciales para obtener la cantidad de azúcares disponibles después de cada hidrólisis; Esto se hace para determinar qué proceso será el más viable y conveniente para la corona de piña.

Preparación del reactivo DNS para la medición de azúcares reductores:

1. Pesar 0,8 g de hidróxido de sodio en la balanza y verterlo en el vaso de precipitados de 250 ml protegido de la luz.
2. Pesar 24 g de Tartrato de Sodio-Potasio y verterlo lentamente hasta que se observe una disolución completa en el mismo vaso de precipitados que contiene el Hidróxido de Sodio.
3. Deje la solución revolviendo constantemente durante 120 minutos.
4. Pesar 0,8 g de ácido 3,5-dinitrosalicílico en la balanza y verterlo en el vaso de precipitados de 250 ml que ya contiene el tartrato de sodio-potasio y el hidróxido de sodio.
5. Deje la mezcla revolviendo constantemente durante 60 minutos.
6. Transfiera la mezcla a un matraz aforado de 100 ml y proceda a volumétrico la solución con agua destilada.
7. Una vez medida la solución, se deja en constante agitación durante 120 minutos.
8. Guarde el reactivo en un frasco y refrigere.

A continuación, se mostrarán los resultados de las determinaciones de lignina en la Tabla 2.

Muestra	Peso inicial	Peso final	% lignina
Molida 1	0.25 g	0.076 g	69.56%
Molida 2	0.5 g	0.199 g	60.09%
Molida 3	1.0035 g	0.3786 g	62.27%
Molida 4	1.0027 g	0.3759 g	62.51%
Ácida 1	1.0035 g	0.4838 g	51.74%
Ácida 2	1.007 g	0.5454 g	45.84%
Alcalina	1.005 g	0.423 g	57.91%

enzimática, además de determinar los azúcares reductores para cada una de las hidrólisis correspondientes.

## Conclusiones

El estudio en curso concluye que es beneficioso transformar los residuos agroindustriales, específicamente la corona de piña, en bioetanol mediante procesos de hidrólisis y fermentación. Este enfoque no solo ofrece una solución innovadora y sostenible para la gestión de residuos, sino que también contribuye a la reducción de la contaminación ambiental y al uso de recursos renovables. Las investigaciones demuestran que mediante el uso de diferentes métodos de hidrólisis (alcalino, ácido y enzimático), es posible extraer una cantidad significativa de azúcares reductores, que son esenciales para la producción eficiente de etanol. Además, la selección adecuada de microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae* y la optimización de las condiciones de fermentación son cruciales para maximizar el rendimiento de etanol.

Desde una perspectiva económica y ambiental, el desarrollo de bioetanol a partir de residuos de piña no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también proporciona una fuente de energía limpia y renovable. Este proceso contribuye a la economía circular, generando productos de valor añadido a partir de residuos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

En resumen, la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales es una estrategia prometedora que puede tener un impacto positivo significativo en la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética, al tiempo que ofrece soluciones prácticas para la gestión de residuos agrícolas.

## **Declaración de no Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

## **Declaración de privacidad**

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

## **Agradecimientos**

A los docentes y asesores por el apoyo brindado durante la formación académica, unidades académicas, secretarías, empresas.

## Referencias

- Becke, A. D. (1993). Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange, *Journal of Chemical Physics*, 98 5648-52. doi:10.1063/1.464913
- Bertout, J. A., Patel, S. A., & Simon, M. C. (2008). The impact of O2 availability on human cancer. *Nature Reviews Cancer*, 8(12), 967-975. doi:10.1038/nrc2540
- Brown, J. M. (2007). Tumor hypoxia in cancer therapy. *Methods in enzymology*, 435, 295-321. doi:10.1016/S0076-6879(07)35015-5
- Chao, Y. A. N. G., Zhong, Z. F., Sheng-Peng, W. A. N. G., Chi-Teng, V. O. N. G., Bin, Y. U., & Yi-Tao, W. A. N. G. (2021). HIF-1: Structure, biology, and natural modulators. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 19(7), 521-527. doi:10.1016/S1875-5364(21)60051-1
- Ditchfield, R., Hehre, W. J., & Pople J. A. (1971). Self-consistent molecular-orbital methods. 9. Extended Gaussian-type basis for molecular-orbital studies of organic molecules. *Journal of Chemical Physics*, 54(2), 724-728. doi:10.1063/1.1674902
- Eberhardt, J., Santos-Martins, D., Tilack, A. F., Forli, S. (2021). AutoDock Vina 1.2.0: New docking methods, expanded force field, and python bindings. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 61, 8, 3891-3898. doi:10.1021/acs.jcim.1c00203
- Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., et al., Gaussian 16, Revision, B.01 2016; Gaussian Inc.: Pittsburgh, PA, USA, 2016.
- Gray, L. H., Conger, A., Ebert, M., Hornsey, S., & Scott, O. C. A. (1953). The concentration of oxygen dissolved in tissues at the time of irradiation as a factor in radiotherapy. *The British Journal of Radiology*, 26(312), 638-648. doi:10.1259/0007-1285-26-312-638
- Hohenberg, H., & Kohn, W., (1964) Inhomogeneous Electron Gas, *Physical Review*, 136, B864-B871. doi:10.1103/PhysRev.136.B864
- Minassian, L. M., Cotechini, T., Huitema, E., & Graham, C. H. (2019). Hypoxia-induced resistance to chemotherapy in cancer. In *Hypoxia and Cancer Metastasis* (pp. 123-139). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-12734-3\_9
- Meng X. Y., Zhang H. X., Mezei M., & Cui M. Molecular docking: a powerful approach for structure-based drug Discovery (2011). *Current Computer-Aided Drug Design*, 7(2):146-57. doi:10.2174/157340911795677602.
- Schönberger, T., Fandrey, J., & Prost-Fingerle, K. (2021). Ways into understanding HIF inhibition. *Cancers*, 13(1), 159. doi:10.3390/cancers13010159

- Thompson, J. D., Higgins, D. G., & Gibson, T. J. (1994). CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Research*, 22(22), 4673-4680. doi:10.1093/nar/22.22.4673
- Trott, O. & Olson, A. J. (2010) AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455-461. doi:10.1002/jcc.21334
- Waterhouse A. M., Procter J. B., Martin D. M. A., Clamp M., & Barton G. J. (2009) Jalview Version 2 - A multiple sequence alignment editor and analysis workbench. *Bioinformatics* 25 1189-1191. doi:10.1093/bioinformatics/btp033
- Webb, B., & Sali, A. Comparative Protein Structure Modeling Using Modeller. *Current Protocols in Bioinformatics* 54, John Wiley & Sons, Inc., 5.6.1-5.6.37, 2016. doi:10.1002/cpbi.3
- wwPDB consortium. Protein Data Bank: the single global archive for 3D macromolecular structure data (2019). *Nucleic Acids Research*, 47, D520-D528, doi:10.1093/nar/gky949