



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA**

**OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE
BIOMASA LIGNOCELULÓSICA: MÉTODOS Y TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
Ingenieros Biotecnólogos**

AUTORES: Hugo Paul Castillo Morejón

Jonathan Ismael Llano Pérez

TUTOR: Christian Fabricio Larenas Uria

Quito-Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Hugo Paul Castillo Morejón con documento de identificación N° 1500964182 y Jonathan Ismael Llano Pérez con documento de identificación N° 1719138164; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 24 de febrero del año 2025

Atentamente,



Hugo Paul Castillo Morejón
1500964182



Jonathan Ismael Llano Pérez
1719138164

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Hugo Paul Castillo Morejón con documento de identificación No. 1500964182 y Jonathan Ismael Llano Pérez con documento de identificación No. 1719138164, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: Optimización en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica: métodos y tecnologías sostenibles, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Biotecnología, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de febrero del año 2025

Atentamente,



Hugo Paul Castillo Morejón
1500964182



Jonathan Ismael Llano Pérez
1719138164

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Fabricio Larenas Uria con documento de identificación N° 1705586046, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA: MÉTODOS Y TECNOLOGÍAS SOSTENIBLES realizado por Hugo Paul Castillo Morejón con documento de identificación N° 1500964182 y por Jonathan Ismael Llano Pérez con documento de identificación N° 1719138164, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de febrero del año 2025

Atentamente,



Christian Fabricio Larenas Uria Ph.D.
1705586046

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
2	Materiales y Métodos	4
2.1	Metodología	4
2.2	Características fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica	5
2.2.1	Celulosa.....	5
2.2.2	Hemicelulosa.....	6
2.2.3	Lignina.....	6
3	Materias primas para biocombustibles de segunda generación	6
4	Tratamientos bioquímicos y térmicos para la conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol	8
5	Pretratamiento de biomasa lignocelulósica	9
6	Pretratamientos Físicos	9
6.1.1	Pretratamiento de extrusión.....	10
6.1.2	Pretratamiento de fresado.....	10
6.2	Pretratamientos Químicos	11
6.2.1	Oxidación Húmeda.....	11
6.2.2	Alcalinización.....	11
6.3	Pretratamientos Fisicoquímicos	11
6.3.1	Explosión de vapor (SE).....	11
6.3.2	Explosión de fibras de amoníaco (AFEX).....	12
6.4	Pretratamientos Biológicos	12
6.4.1	Tratamiento con hongos (fungi).....	12
6.4.2	Tratamiento con bacterias.....	13
6.4.3	Enzimas obtenidas de microorganismos.....	13
7	Parámetros de pretratamiento y cristalinidad de la biomasa	15
8	Proceso de hidrólisis ácida	16
9	Proceso de hidrólisis enzimática	17
9.1.1	Clasificación de celulasas.....	18
9.1.2	Grados de Concentración de las Enzimas.....	19
10	Fermentación y microorganismos participantes	21
11	Destilación	24
12	Resultados y Discusión	25
12.1	Obtención de biocombustible de segunda generación y su impacto	25
12.2	Comparación con otros biocombustibles	27
12.3	Comparación con combustibles fósiles	32
13	Conclusiones y perspectivas futuras	36
	Referencias	38

Índice de Figuras

Figura 1. La pared celular de la biomasa lignocelulósica, incluida su composición y estructura.	4
Figura 2. Proceso de obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica.....	18
Figura 3. Tipos de fermentación.	24
Figura 4. Producción mundial media estimada de etanol lignocelulósico (2016 - 2026).	26
Figura 5. Generación de bioetanol a partir de residuos agrícolas.	30
Figura 6. Generación de biodiésel a partir de residuos agrícolas.....	30
Figura 7. Generación de biogás - biometano a partir de residuos agrícolas.....	31
Figura 8. Generación de biobutanol a partir de residuos agrícolas.	31
Figura 9. Producción anual de materia prima para biocombustibles de 2022.	35
Figura 10. Producción anual de materia prima para combustibles fósiles de 2022.	36

Índice de Tablas

Tabla 1. Materias primas de biomasa lignocelulósica agrícola para la producción de bioetanol.	7
Tabla 2. Biomasa de materiales lignocelulósicos de residuos agrícolas utilizados para prácticas de pretratamiento, microorganismos utilizados, condiciones de fermentación y rendimiento de etanol obtenido.....	8
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los métodos de pretratamiento más relevantes aplicados a biomasa lignocelulósica.....	14
Tabla 4. Clasificación de celulasas para el proceso de hidrólisis.....	19
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los tipos de hidrólisis.	20
Tabla 6. Producción de bioetanol a partir de materias primas lignocelulósicas bajo diferentes tipos de fermentación y las cepas utilizadas.....	23
Tabla 7. Producción media mundial de etanol lignocelulósico desde 2016 hasta 2026 en gicalitros GL.	26
Tabla 8. Análisis de diferentes tipos de materias primas lignocelulósicas con sus respectivos biocombustibles y producción.	28
Tabla 9. Comparación de aspectos relevantes de biocombustibles y combustibles fósiles.....	33
Tabla 10. Comparación de combustibles en materia prima, países productores y observaciones.	34

Resumen

Los combustibles fósiles se han convertido en la mayor fuente de sustento energético de la humanidad. Sin embargo, su principal problema es que son recursos no renovables y que provocan diversos efectos negativos. En este sentido, el bioetanol se convierte en una alternativa energética atractiva de aprovechamiento, ya que es considerado como un combustible neutro en carbono, además este tipo de biocombustibles ha conseguido rápidos avances en los últimos años. La presente revisión pretende explicar y definir las tecnologías sostenibles como son los tipos de pretratamiento, hidrólisis ácida y enzimática, fermentación y destilación involucradas en el proceso de obtención de bioetanol mediante la utilización de biomasa lignocelulósica de tipo vegetal residual. Por lo tanto, las metodologías utilizadas para contrastar la información son provenientes de diferentes fuentes bibliográficas de recientes estudios enfocados en este campo incluyendo revisiones sistemáticas y metaanálisis; para obtener como resultados la observación de rendimiento y sostenibilidad del bioetanol tomando en cuenta el tipo de materia prima empleada, sustentándolo en una comparación con otros biocombustibles y combustibles fósiles. Finalmente se incluirán perspectivas futuras dirigidas hacia este tipo de tecnología amigable con la naturaleza y que puede contribuir significativamente a la transición hacia fuentes de energía sostenibles.

Palabras Clave

biomasa, lignocelulósica, pretratamiento, hidrólisis, bioetanol

Abstract

Fossil fuels have become the major source of energy sustenance for mankind. However, their main problem is that they are non-renewable resources and cause various negative effects. In this sense, bioethanol has become an attractive energy alternative for use, as it is considered a carbon neutral fuel, and this type of biofuel has made rapid progress in recent years. This review aims to explain and define the sustainable technologies such as the types of pretreatments, acid and enzymatic hydrolysis, fermentation and distillation involved in the process of obtaining bioethanol using residual vegetable lignocellulosic biomass. Therefore, the methodologies used to contrast the information come from different bibliographic sources of recent studies focused on this field including systematic reviews and meta-analysis; to obtain as results the observation of bioethanol performance and sustainability taking into account the type of raw material used supporting it in a comparison with other biofuels and fossil fuels. Finally, future perspectives directed towards this type of nature-friendly technology, which can contribute significantly to the transition towards sustainable energy sources, will be included.

Keywords

biomass, lignocellulosic, pretreatment, hydrolysis, bioethanol

1 Introducción

En los últimos años, el crecimiento demográfico y el avance tecnológico han provocado un aumento en la demanda de los combustibles fósiles. En consecuencia, ha provocado grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que representan una seria amenaza tanto para la salud humana como para la estabilidad de la naturaleza (Pendse et al., 2023). A su vez, los problemas energéticos globales continuarían agravándose. Esta problemática se vería reflejada principalmente en el desgaste continuo de los depósitos de petróleo elevando su precio de adquisición (Jayakumar et al., 2023). Por tal razón, se sostiene que para el año 2040 se podrá evidenciar altos valores de consumo en un 28% más que en la actualidad (R. Kumar et al., 2020; Mankar et al., 2021), lo que hace urgente encontrar nuevos modelos de sostenibilidad ecológica.

Una solución prometedora que se está empleando es la bioconversión de materiales lignocelulósicos ya que es un recurso abundante, renovable y reciclable, es así que el bioetanol obtenido actuaría como fuente de combustible aprovechable reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles. Como resultado, varios países como EE. UU., Brasil, China, Canadá, India, Tailandia, Argentina y varios integrantes de la Unión Europea (UE) se han comprometido a contribuir con el desarrollo de esta alternativa (Broda et al., 2022).

Los aportes más grandes de bioconversión pertenecen principalmente a EE. UU (56%), seguido de Brasil (28%) y la Unión Europea (5%), dado a que consiguen un máximo aprovechamiento del material vegetal. Se espera que su apoyo en el mercado global de etanol continúe en desarrollo, ya que particularmente las políticas de EE. UU y la UE promueven hacia el progreso de producción de biocombustibles (Karagoz et al., 2019).

La producción de bioetanol puede ofrecer diversas perspectivas beneficiosas en el ámbito económico, demostrando sostenibilidad a través de la implantación del término “bioeconomía circular” que mantiene un enfoque de circuito cerrado para producir productos de valor agregado y biocombustibles. Es así que un ejemplo de ello es la incorporación de las tecnologías de biorrefinerías que proporcionan gran valorización a los desechos agrícolas generando tasas de empleo en áreas rurales, producción de subproductos aprovechables para el sector agrícola, mejoramiento en las técnicas de tratamiento y métodos de obtención debido al aprendizaje tecnológico basado en la experiencia para la obtención de biocarburantes, mayor demanda en el mercado de bioenergía permitiendo una gran expansión en sus cadenas de

suministro, todas estas ventajas conducen a incrementar las ganancias en este campo y con ello se pueden generar ahorros en los costos de producción (Joseph et al., 2023; Ye et al., 2024).

Además, pueden ser apoyados por fondos financieros de aquellos países como Estados Unidos y la Unión Europea que están apoyando la visión de diversificación energética. Del mismo modo, se pueden realizar análisis exergéticos que permitirían evaluar la eficiencia en los procesos, considerando la calidad y disponibilidad de las materias primas, los insumos energéticos para la conversión, el rendimiento y la calidad del bioetanol producido para determinar con veracidad la rentabilidad a escalas industriales, manteniendo un nivel operacional eficiente (Meng et al., 2021).

Por otro lado, los beneficios ambientales que brindan la bioconversión de bioetanol están estrechamente relacionados a la huella de carbono, siendo así que contiene un 35% de oxígeno, lo que marca la diferencia en la combustión total del combustible por lo que sus emisiones de dióxido de carbono y toxicidad son inferiores apoyando a la mitigación del cambio climático preservando el entorno ecológico y los recursos naturales, respaldando el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible internacionales en el apartado energético planificados hasta el 2030 (Vasilakou et al., 2023).

En general, el bioetanol derivado de biomasa lignocelulósica es el combustible líquido que brinda grandes ventajas en el transporte, particularmente mezclado con gasolina en proporciones que pueden ser de 5 al 10% aumentando su octanaje, también es biodegradable mejorando la calidad del aire y reduciendo la dependencia de los combustibles a base de petróleo. De igual manera, el avance tecnológico en las técnicas de producción permite realizar reciclajes de subproductos tóxicos generados durante los procesos evitando contaminación secundaria, asegurando una mayor seguridad en el desarrollo de estos (Hu et al., 2023).

Si bien la idea de adoptar la generación de bioetanol suena prometedora, existen algunas limitaciones, siendo la principal de ellas la utilización de las materias primas a base de azúcar dado a que afectan el suministro de alimentos provocando problemas de competencia con los cultivos alimentarios (S. Singh et al., 2022). Además, aumentan la demanda de recursos de tierra y agua con posibles contaminaciones por residuos de destilación (Broda et al., 2022).

Es por ello que los avances en bioconversión se encuentran en la transición de biocombustibles de primera generación hacia los de segunda generación a partir de biomasa

lignocelulósica no comestible entre los cuales pueden destacarse, residuos agrícolas, forestales, industriales, entre otros. Este tipo de materias no están directamente relacionadas con la seguridad alimentaria, igualmente su objetivo se centra en desarrollar mejoras en los métodos de pretratamiento y efectividad en el uso de hidrólisis tanto ácida como enzimática tomando en cuenta los parámetros que puedan afectar a sus procesos (Beluhan et al., 2023).

Por esa razón los residuos agrícolas vegetales son los que mayor foco de atención poseen, ya que están conformados por la paja de trigo, paja de arroz, el bagazo de caña de azúcar, las mazorcas de maíz, las cáscaras de diferentes vegetales y frutas que se pueden utilizar para la producción de bioetanol (S. Singh et al., 2022). Según las estimaciones recientes realizadas de FAOStat 2022, existe una producción anual de residuos de $3,71 \times 10^{10}$ kg de nutrientes para todos los cultivos combinados (Tubiello et al., 2022).

Por consiguiente, es necesario comprender que los materiales lignocelulósicos están divididos en tres componentes principales los cuales son la hemicelulosa, celulosa y lignina donde estas dos últimas representan alrededor del 70% de toda la biomasa. La celulosa es un polímero lineal compuesto por unidades de glucosa en los procesos de bioconversión, por su parte las hidrolasas son las enzimas encargadas de catalizar la hidrólisis de la celulosa, descomponiéndola en moléculas de glucosa.

En el caso de la hemicelulosa y la lignina se adhieren a las paredes celulares de las plantas formando una red cohesiva, la hemicelulosa se entrelaza con las microfibrillas de celulosa, actuando como un conector que las mantiene unidas y aportando flexibilidad a la estructura. La lignina, por su parte, se deposita en los espacios entre estas microfibrillas y la hemicelulosa, creando enlaces químicos que refuerzan la pared celular, estas sustancias forman una estructura resistente y duradera que protege y sostiene a la planta (Vasić et al., 2021). En la **Figura 1** se muestra en resumen toda la composición de este tipo de biomasa.

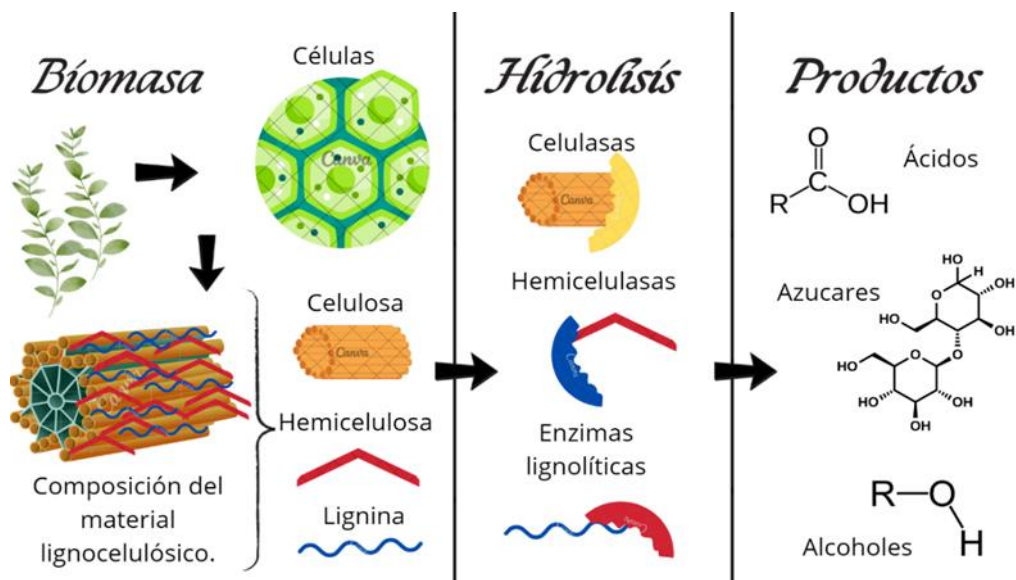


Figura 1. La pared celular de la biomasa lignocelulósica, incluida su composición y estructura. Elaborado por (Los autores, 2024)

En este contexto, la revisión tiene el propósito de contribuir con información de las principales características fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica, materia prima proveniente de residuos agrícolas y los principales métodos de pretratamiento e hidrólisis ácida y enzimática dirigidas a la fermentación y destilación para la producción de alcohol etílico (bioetanol), incluyendo algunos de los microorganismos más efectivos que pueden participar en la transformación del producto, todo con sus respectivas ventajas y desventajas. El objetivo es explorar en detalle la bioconversión de materiales lignocelulósicos y su rendimiento como biocombustibles de segunda generación en comparación con otros combustibles; considerando su impacto en la sostenibilidad energética para garantizar su viabilidad en el futuro.

2 Materiales y Métodos

2.1 Metodología

Para la elaboración y cumplimiento de los objetivos propuestos en este artículo se determinaron criterios de búsqueda y selección bibliográfica, de tal manera que se usaron fuentes de información secundaria, una vez planteadas se procedió a la búsqueda de documentos (artículos de revisión y artículos de investigación) mediante bases de datos como ScienceDirect, Scopus, y Google académico, las dos primeras bases de datos son recursos electrónicos proporcionados por la Universidad Politécnica Salesiana, siendo a su vez plataformas que brindan el acceso a información confiable y actualizada en temas de investigación técnica y

científica. Una vez establecidas las bases de datos se determinaron tres criterios para la selección de la información:

El primero fue el año, donde se tuvo en cuenta documentos publicados en un periodo de 14 años (2010 – 2024), puesto que aquellos pertenecientes en el rango de tiempo menor al establecido cuentan con una menor profundización del tema; se realizó un mayor énfasis en los últimos 5 años debido a que el promedio de artículos publicados durante este lapso de tiempo aumento en 176,60 por año, lo que significa un mayor interés en los estudios relacionados a las actividades de pretratamiento e hidrólisis ácida y enzimática de desechos agrícolas hacia la sostenibilidad ambiental e implementación de una economía circular.

El segundo criterio, se determinó las palabras claves en el idioma inglés para ampliar el rango de búsqueda en las bases de datos propuestas, ejemplos relacionados con biocombustibles de segunda generación como (bioethanol from lignocellulosic biomass), (pretreatments for lignocellulosic biomass), (hydrolysis for obtaining bioetanol), (second generation biofuel studies), por medio de este criterio también se fijó un límite de citas por autores tomando en cuenta sus fuentes de investigación secundaria del tema y sus índices de impacto contando con aproximadamente 70 referencias proporcionando una mayor contrastación. En el tercer criterio, se organizó la información recolectada con ayuda de la herramienta Mendeley para posteriormente seleccionar los datos con fundamentación considerable y realizando su respectiva argumentación para la elaboración de este documento que es totalmente descriptivo, con la finalidad de que la información presentada genere en el lector una mayor comprensión del tema.

2.2 Características fisicoquímicas de la biomasa lignocelulósica

Es importante resaltar que los componentes de cualquier tipo de biomasa contienen sus complejidades estructurales y naturaleza recalcitrante. En general los valores de su composición están dados por celulosa (35-50%), hemicelulosa (20-35%) y lignina (5-30%), siendo así que estos porcentajes pueden variar significativamente dependiendo de la fuente de materia prima de biomasa (Kassaye et al., 2016; Mankar et al., 2021).

2.2.1 Celulosa

La celulosa es representada como uno de los principales componentes primarios de la biomasa lignocelulósica, desempeñando un papel vital en resistencia mecánica y estabilidad

química para las plantas (Jayakumar et al., 2023). Está conformado por un polímero estructural de glucosa combinado con enlaces glucosídicos β (1-4), es por este enlace que posee una estructura cristalina compacta y altamente resistente capaz de sostener las hidrolisis biológicas y químicas (Bansod et al., 2024).

2.2.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un tipo de heteropolímero lineal y ramificado conformado por azúcares que son las pentosas (xilosa y arabinosa) y las hexosas (C6), azúcares que incluyen manosa, galactosa y glucosa, son las unidades repetitivas en la estructura de enlaces de cadena principal (1-4) de las hemicelulosas (Periyasamy et al., 2023). El caso de la hemicelulosa es diferente debido a su poca resistencia en comparación con la celulosa agregado a su naturaleza amorfa, consigue hidrolizarse suavemente, incluyendo tratamientos ácidos y enzimáticos (Bansod et al., 2024).

2.2.3 Lignina

En el caso de la lignina es el componente más recalcitrante de la biomasa siendo un heteropolímero conformado por unidades de alcohol propílico fenilo compuestos por alcohol sinapílico, alcohol p-cumarílico y coniferílico. Estos a su vez están unidos entre sí por enlaces alcano y éter provocando dificultad en la degradación de la lignina (Malik et al., 2022; Rezanía et al., 2020). La ventaja de la lignina es que puede generar energía cuando se quema; por lo tanto, se considera una fuente de combustible en la producción de etanol celulósico (Rai et al., 2022).

3 Materias primas para biocombustibles de segunda generación

La búsqueda de fuentes en carbohidratos innovadoras y funcionales para la producción de biocombustibles basadas en bioetanol está adquiriendo gran relevancia en investigaciones actuales. La composición bioquímica de la biomasa, métodos de cultivo, disponibilidad, generación de emisiones de dióxido de carbono, el valor de la materia prima y beneficios económicos son algunos de los factores que se evalúan para encontrar su viabilidad (Periyasamy et al., 2023; Toor et al., 2020). Este tipo de materias llevan a un nuevo planteamiento futurista para la producción de etanol, siendo la forma con mayor abundancia en lignocelulosa, además se estima que para el año 2050 dos tercios de las necesidades energéticas serán cubiertas por las mismas (Periyasamy et al., 2023; B. Singh et al., 2019).

Aunque los combustibles de segunda generación pueden presentar varias ventajas también tienen sus limitaciones, por lo cual se están llevando a cabo varios estudios e investigaciones para perfeccionar sus métodos de generación (Binod et al., 2019). El rendimiento de etanol en este tipo de biocombustible depende del tipo de biomasa vegetal residual, también del bajo contenido de lignina y los altos contenidos de celulosa y hemicelulosa. A continuación, se muestra la **Tabla 1** y **Tabla 2** definiendo estos parámetros entre las materias primas más destacables de la última década.

Tabla 1. Materias primas de biomasa lignocelulósica agrícola para la producción de bioetanol.

Tipo de Biomasa	Porcentaje de Celulosa	Porcentaje de Hemicelulosa	Porcentaje de Lignina	Referencias
Bagazo	40.8	24.1	33.7	(Philippini et al., 2019)
Cáscaras de plátano	25.8	19.5	18.1	(Palacios et al., 2017)
Paja de cebada	40	27.2	7.8	(Raud et al., 2021)
Pulpa de zanahoria	16.8	4	6.9	(Khoshkho et al., 2022)
Cáscaras de yuca	37.9	37	7.5	(Mardina et al., 2021)
Mazorca de maíz	31.6	45.8	12.9	(Selvakumar et al., 2022)

Elaborado por (Los autores, 2024)

Tabla 2. Biomasa de materiales lignocelulósicos de residuos agrícolas utilizados para prácticas de pretratamiento, microorganismos utilizados, condiciones de fermentación y rendimiento de etanol obtenido.

Tipo de Biomasa	Pretratamiento empleado	Microorganismos implicados	Condiciones de temperatura y tiempo de conversión	Rendimiento de etanol	Referencias
Bagazo de caña de azúcar	Físico: Ultrasonido	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	12h a 49°C	6.38 g/L	(Kandasamy et al., 2017)
Residuos de maíz	Físico: Microondas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24h a 35°C	8.73 g/L	(Aguilar-Reynosa et al., 2017)
Paja de trigo	Físicoquímico: NaOH asistido por microondas	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	108h a 30°C	6.82 g/L	(Tsegaye et al., 2019)
Paja de arroz	Químico	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24h a 45°C	11.77 g/L	(Castro y Roberto, 2015)
Centeno	Químico	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	72h a 35°C	20.63 g/L	(Mikulski y Kłosowski, 2018)

Elaborado por (Los autores, 2024)

4 Tratamientos bioquímicos y térmicos para la conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol

En la actualidad se manejan dos vías para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos estos corresponden a la conversión bioquímica y conversión termoquímica. En el caso de la conversión termoquímica la biomasa lignocelulósica es convertida en gas de

síntesis mediante catalizadores no biológicos (como el calor), el producto obtenido se transforma en bioetanol, metanol u otros alcoholes superiores por conversión Fischer-Tropsch (A. K. Kumar y Sharma, 2017; Malik et al., 2022).

La vía bioquímica requiere primero de un pretratamiento seguido de la hidrólisis enzimática, después de una fermentación por microorganismos (bacterias y levaduras) y finalmente la destilación de bioetanol, ambos procesos cumplen el objetivo de degradar el material mediante el cual se hidroliza los polisacáridos convirtiéndolos en azúcares (Malik et al., 2022; Velasco y Burgos, 2020).

5 Pretratamiento de biomasa lignocelulósica

El proceso de pretratamiento de lignocelulosa es de los pasos más importantes para la desintegración de sus tres componentes para su posterior conversión en biocombustible. Es importante considerar que se involucran algunos factores de relevancia como el consumo de energía y los recursos económicos (Mankar et al., 2021).

El pretratamiento es definido como una operación compleja de separación de componentes modificando la disposición tanto química, microestructural y macroestructural de las lignocelulosas volviéndola más susceptible a la degradación por microorganismos. Debido a esta alteración se consigue mejorar la digestibilidad en celulosa y hemicelulosa, eliminando sus fracciones para reducir la cristalinidad y maximizar la porosidad permitiendo mejorar el proceso de hidrólisis (Bansod et al., 2024; Yusuf y Inambao, 2019).

En general, los enfoques de pretratamiento se pueden categorizar en cuatro tipos siendo físicos, químicos, fisicoquímicos utilizados ampliamente para mejorar la calidad del sustrato para la digestión y, por último, los biológicos aplicados para romper recubrimientos de lignina y alterar la estructura de la celulosa (Jayakumar et al., 2023; Rai et al., 2022). En las siguientes secciones, se proporcionará ejemplos de los más relevantes de cada uno de ellos con sus ventajas y desventajas.

6 Pretratamientos Físicos

Es uno de los métodos más utilizados de pretratamiento y en recientes estudios se han desarrollado una mayor gama de enfoques tanto mecánicos y no mecánicos con la finalidad de mejorar la accesibilidad enzimática de la biomasa lignocelulósica en conjunto de las fibras celulósicas (Periyasamy et al., 2023). El objetivo principal del método es reducir el tamaño de

partículas y la cristalinidad, se pueden emplear diferentes herramientas y técnicas entre las más destacadas son el uso de moliendas, trituradoras, radiaciones ultravioletas o microondas, que pueden ser apoyadas por otras fuentes como el uso de productos químicos, disolventes o enzimas para mayor eficacia (Ashokkumar et al., 2024).

6.1.1 Pretratamiento de extrusión

Este método de pretratamiento es utilizado mediante las máquinas de extrusión, que se componen principalmente de dos categorías: las extrusoras de un solo tornillo, que comprenden una parte sólida, y las de doble tornillo con una disposición cilíndrica de pequeños tornillos ambos instalados en un barril ajustado (Chakraborty et al., 2024; Lu et al., 2022). El proceso ocurre cuando los tornillos giran para generar fuerzas de corte entre el tornillo, la biomasa y el barril después que la biomasa haya sido cargada en el extrusor. Es una técnica termomecánica debido a que genera una alta presión y temperatura por las fuerzas de cortes producidas en el extrusor (Duque et al., 2017; Mankar et al., 2021). Ambos factores tanto la presión y temperatura generan cambios sobre la estructura física y química de la biomasa, aumentando su área superficial y, por lo tanto, adquiere una mayor accesibilidad de las enzimas (B. Kumar et al., 2020).

Una vez realizada la extrusión, es importante realizar una evaluación visual del extruido mostrando cómo el pretratamiento afectó a la biomasa, se reconoce en el tamaño de partícula encogido y adquiere un aspecto áspero y desmenuzable; además, el exterior quedará fragmentado (Chong et al., 2021). El método presenta varias ventajas, como un mejor tratamiento de la biomasa y no requiere de agentes químicos o catalizadores adicionales. Sin embargo, sus desventajas son el alto nivel de energía de consumo y de costos operacionales (Chakraborty et al., 2024; Dahunsi, 2019).

6.1.2 Pretratamiento de fresado

El método de fresado es una técnica de pretratamiento que consiste principalmente en reducir el tamaño de partículas de la biomasa. Se pueden realizar de diferentes maneras, entre las cuales se pueden destacar la molienda o trituración obteniendo como resultado un tamaño de partícula entre 0,2 a 2 mm, por otro lado, el astillado genera partículas de 10 a 30 mm. Las técnicas de molienda se diferencian según el equipo utilizado como puede ser la molienda de disco húmedo, de bolas, martillos, barras, vibratorias entre otros (Ashokkumar et al., 2024; Chakraborty et al., 2024).

Entre las ventajas que se pueden atribuir a este método es que generan una mayor inclusión de área superficial de la biomasa para la hidrólisis, reducción de la cristalinidad en celulosa, mejora la transferencia de masa por disminución de partícula y menor grado de polimerización. A pesar de ser una técnica atractiva, no está exenta de algunas desventajas que son su alto valor de consumo energético que asciende en un 33%, provocando que sea altamente costoso. Otro desafío de la técnica es que no consigue eliminar completamente la lignina reduciendo la accesibilidad de las enzimas hacia la celulosa y hemicelulosa, por lo que continúan los estudios para encontrar optimizar la duración y alimentación de biomasa en el proceso (Mankar et al., 2021).

6.2 Pretratamientos Químicos

6.2.1 Oxidación Húmeda

La oxidación húmeda es un pretratamiento químico de biomasa lignocelulósica que utiliza agentes oxidantes como oxígeno, ozono o peróxido de hidrógeno en presencia de agua, a altas temperaturas y presiones, este proceso descompone la estructura de la biomasa, liberando azúcares fermentables y aumentando la accesibilidad de la celulosa al romper eficientemente enlaces de lignina y hemicelulosa. Sin embargo, requiere un control preciso de temperatura y presión, lo que complica su implementación a gran escala (Espinosa et al., 2021).

6.2.2 Alcalinización

Este método utiliza soluciones alcalinas (como hidróxido de sodio) para eliminar lignina y hemicelulosa, lo que aumenta la accesibilidad de la celulosa. Se lleva a cabo a temperaturas moderadas y puede implicar la aplicación de calor. Mejora la accesibilidad de la celulosa para las enzimas durante la hidrólisis enzimática y reduce la cantidad de lignina, facilitando el proceso de fermentación, pero puede requerir un tratamiento posterior para neutralizar el pH, aumentando los costos (Espinosa et al., 2021).

6.3 Pretratamientos Físicoquímicos

6.3.1 Explosión de vapor (SE)

Es una de las técnicas de pretratamiento que ha ganado gran popularidad para la digestión de biomasa lignocelulósica agrícola residual. Este método consiste en descomponer la estructura de la biomasa a través métodos químicos y físicos, su procedimiento mantiene un enfoque de despresurizar el sistema después de exponer el material a altas presiones y

temperaturas, para destruir la estructura fibrosa de la biomasa. La descomposición permite que las enzimas utilicen la celulosa para el proceso de hidrólisis, siendo que las temperaturas idóneas son entre 190 a 270 °C por intervalos de 1 a 10 minutos, tomando en cuenta que el tamaño de partícula juega un rol importante durante todo el proceso (Ziegler-Devin et al., 2021).

Entre sus ventajas se puede resaltar que es un método asequible, eficiente y respetuoso con la naturaleza ya que no emplea aditivos químicos. Sin embargo, entre sus desventajas se destacan que requiere emplear mayores procesos físicos para reducir eficientemente el tamaño de partícula, implicando altos gastos energéticos y costos operacionales (Jayakumar et al., 2023).

6.3.2 Explosión de fibras de amoníaco (AFEX)

Es un método que consiste en tratar la biomasa con amoníaco líquido anhidro en relación 1:1 p/p a temperaturas de reacción moderadas entre los 30 a 60 °C en intervalos de 5 a 60 minutos y utilizando altas presiones de 15 a 30 bar (Chakraborty et al., 2024). El procedimiento provoca un agrandamiento en la biomasa por la altas presiones y temperatura, ocasionando una rotura de su estructura porosa, además reduce la cristalinidad, lo que resulta en una mejor accesibilidad de enzimas. La técnica ofrece varias ventajas, incluidos bajos requisitos de líquidos y productos químicos, condiciones de procesamiento leves y baja producción de desechos. Ha sido eficiente en pretratamiento de materias primas como el rastrojo de maíz y pasto de varilla (Mahmud y Rosentrater, 2021).

Una de las principales desventajas de este método es la recuperación de amoníaco. Es por ello que es necesario encontrar una alternativa rentable para recuperar lo utilizado después del procedimiento, comúnmente se emplea evaporación (Jayakumar et al., 2023).

6.4 Pretratamientos Biológicos

6.4.1 Tratamiento con hongos (fungi)

Este método utiliza hongos ligninolíticos como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium*, que producen enzimas como ligninasas y celulasas para descomponer la lignina y polisacáridos de la biomasa lignocelulósica. Aunque el proceso es lento y puede tardar semanas, es altamente eficaz en la reducción de lignina, mejorando la accesibilidad de la celulosa. Sus ventajas incluyen ser un proceso natural, menos dañino para el medio ambiente y de bajo costo energético, ya que requiere condiciones menos extremas que los métodos

químicos, su principal desventaja es el largo tiempo requerido, lo que limita su uso industrial, además de depender de factores ambientales como temperatura, humedad y el tipo de hongo empleado (Akyol et al., 2019; Paredes Medina et al., 2010).

6.4.2 Tratamiento con bacterias

Este proceso emplea bacterias como *Clostridium spp.* y *Bacillus spp.* que producen enzimas capaces de degradar la biomasa y liberar azúcares fermentables bajo condiciones controladas de temperatura y pH, estas bacterias son eficaces en la descomposición de compuestos específicos, mejorando la recuperación de azúcares. Además, pueden generar ácidos orgánicos y otros compuestos de interés, sin embargo, el proceso requiere condiciones estrictas para un crecimiento óptimo, lo que puede complicar su implementación, y es susceptible a contaminantes que pueden reducir su eficiencia y rendimiento (Deivayanai et al., 2022; Paredes et al., 2010)

6.4.3 Enzimas obtenidas de microorganismos

Las enzimas producidas por hongos y bacterias, como celulasas y hemicelulasas, se utilizan para descomponer la biomasa en azúcares simples, actuando de manera específica sobre la celulosa y hemicelulosa. Este método es eficaz para liberar azúcares fermentables con pocos subproductos, minimizando la generación de compuestos indeseables que puedan inhibir procesos posteriores. Sin embargo, presenta desventajas como su alto costo, debido a la producción y purificación de las enzimas, y la lentitud del proceso de hidrólisis, que depende del tipo de enzima y las condiciones de operación, lo que dificulta su aplicación a gran escala (Abolore et al., 2024; Niño López et al., 2013).

Los métodos biológicos de pretratamiento destacan por sus bajas necesidades energéticas, la ausencia de productos químicos, bajos costos de reciclaje y procesamiento, mínima generación de compuestos inhibitorios, facilidad de operación y respeto al medio ambiente. Por lo tanto, presentan limitaciones como la necesidad de mucho espacio, un proceso lento y la exigencia de un control continuo del crecimiento y actividad microbiana, lo que dificulta su adopción generalizada en la industria (Niño et al., 2013). Con todos los pretratamientos más relevantes descritos, a continuación, se muestra la **Tabla 3** a manera de resumen de sus ventajas y desventajas con mayor impacto:

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los métodos de pretratamiento más relevantes aplicados a biomasa lignocelulósica.

Tipo de Pretratamiento	Método	Ventajas	Desventajas
Físicos	Extrusión	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mejor tratamiento de la biomasa y accesibilidad a las acciones enzimáticas. ➤ No requiere de uso de agentes externos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alto gasto energético y costos operacionales. ➤ Dificultad en la regulación de temperatura.
	Fresado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reducción de la complejidad de la estructura biomasa. ➤ Minimiza la cristalinidad y grado de polimerización. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Consumo energético elevado. ➤ Tendencia a la formación de grumos.
Fisicoquímicos	Explosión de Vapor (SE)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transformación rentable de solubilización de lignina y hemicelulosa. ➤ Mejor rendimiento de glucosa y hemicelulosa. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Degradación parcial de hemicelulosa. ➤ Generación de inhibidores.
	Explosión de fibras de amoníaco (AFEX)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumenta la superficie en biomasa a condiciones leves ➤ Baja producción de desechos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se requiere el reciclaje de amoníaco. ➤ Adquisición del amoníaco es altamente costosa.
Químicos	Ácida	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eficiente para fragmentar enlaces lignocelulósicos. ➤ Rápido y eficaz. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puede producir compuestos inhibidores. ➤ Precaución en el manejo cuidadoso de ácidos.
	Oxidación Húmeda	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor degradación de azúcares liberados. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costo elevado de los agentes oxidantes.

		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eficiencia en la descomposición de lignina y hemicelulosa. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Requiere condiciones controladas precisas.
	Alcalinización	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumenta la porosidad de la biomasa. ➤ Minimiza la cantidad de lignina. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puede dañar algunos compuestos esenciales. ➤ Proceso lento.
Biológicos	Tratamiento con hongos (fungi)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sostenible ➤ Bajo costo energético. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Largo tiempo de procesamiento ➤ Variabilidad en efectividad.
	Fermentación con bacterias	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Proceso selectivo. ➤ Producción de metabolitos útiles. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Condiciones controladas necesarias. ➤ Riesgo de contaminación.
	Enzimas obtenidas de microorganismos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alta eficiencia. ➤ Menos subproductos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costo elevado. ➤ Requiere tiempo.

Elaborado por (Los autores, 2024)

7 Parámetros de pretratamiento y cristalinidad de la biomasa

En cada proceso de pretratamiento existen diferentes parámetros que influyen en el tratamiento de la biomasa entre los más importantes se encuentran el grado de polimerización, la accesibilidad de superficie, contenido de lignina y hemicelulosa, además de los niveles de cristalinidad que se van a describir a continuación:

El grado de polimerización es un factor que afecta a la hidrólisis enzimática, debido a la presencia de largas cadenas de celulosa unidas por enlaces de hidrógeno, por otro lado, si las cadenas se acortan, sus enlaces son reducidos, lo que resulta en un mejor acceso para las enzimas. Es por ello que incrementar la susceptibilidad de la celulosa para que hidrolice, contribuye a disminuir la polimerización. Para el caso de la accesibilidad de superficie para las enzimas se toma en cuenta la relación con el crecimiento del tamaño del poro en la celulosa. Al eliminar la hemicelulosa produce un aumento en el tamaño de los poros y, por lo tanto, mejora la capacidad de hidrólisis, por otro lado, el secado de la lignocelulosa en el pretratamiento puede causar un bloqueo en la estructura de los poros, lo que resulta en una reducción de la tasa de

hidrólisis enzimática, por ello debe revisarse las condiciones del pretratamiento escogido (Luzardo Gorozabel et al., 2023; Xu et al., 2019).

El contenido de lignina y hemicelulosa se enfoca en su recalcitrancia siendo una de las principales características de la biomasa, generando problemas en el acceso de las enzimas para la hidrólisis (Choi et al., 2019; Luzardo Gorozabel et al., 2023). La hemicelulosa por su parte puede obstaculizar la hidrólisis enzimática de la celulosa, ya que contiene enlaces covalentes con la lignina, formando complejos de lignina y carbohidrato. La propia lignina también puede restringir el acceso de las enzimas celulasas, esto debido a que bloquea la progresión de escisión de cadenas de celulosa (Gill et al., 2021; Luzardo Gorozabel et al., 2023). Bajo estas premisas es importante adecuar las condiciones de pretratamiento que no sean muy débiles, pero tampoco fuertes ya que pueden producir desechos no deseados.

La cristalinidad en la biomasa enfocada en celulosa es formada por los enlaces hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals. Esta cristalinidad provoca resistencia en la biomasa al ataque enzimático y químico, y por consecuencia, se reduce la hidrólisis (Luzardo Gorozabel et al., 2023; Xu et al., 2019). En el caso de hidrólisis ácida la resistencia se da por el lado hidrofóbico de fibrillas de celulosa cristalina, mientras que en la hidrólisis enzimática ocurre por la fuerza que ejerce la red de enlaces de hidrógeno entre las cadenas, cabe destacar que la disminución de la cristalinidad enriquece la digestibilidad de las lignocelulosas (Islam et al., 2020; Luzardo Gorozabel et al., 2023).

8 Proceso de hidrólisis ácida

Una vez que se ha terminado la práctica de pretratamiento sobre la biomasa, los materiales de celulosas se encuentran listos para el proceso de hidrólisis. En la hidrólisis ácida primero se rompe la pared celular de la biomasa e hidrolizará la hemicelulosa, inmediatamente se produce la despolimerización de polisacáridos de celulosa y finalmente los azúcares simples obtenidos pueden ser utilizados para el proceso de fermentación. La conversión ocurre por la adición de una molécula de agua, provocando reacciones que son complejas (Aditiya et al., 2016).

Se pueden utilizar diferentes ácidos entre los más comunes se encuentran el ácido clorhídrico, nítrico, fluorhídrico y sulfúrico, además de ácidos orgánicos como cítrico y acético. La hidrólisis y los procesos siguientes dependen del pretratamiento de la biomasa (Zhai et al., 2022).

En este tipo de hidrólisis se pueden encontrar dos categorías que son hidrólisis ácida diluida y concentrada.

En hidrólisis diluida ocurre la descomposición de los cristales de celulosa, las condiciones utilizadas son de entre 1 a 3% de concentración de ácido, sometido a temperaturas considerablemente altas entre 200 a 240°C, los tiempos de reacción ocurren entre los 30 minutos a 2 horas en procesos continuos. A continuación, se produce una descomposición de hexosa y pentosa, sin embargo, su principal desventaja es la generación de sustancias tóxicas como el hidroximetilfulfural y otros compuestos fenólicos que generan problemas para la fermentación de los microorganismos, además de corrosión en los equipos (Jayakumar et al., 2023; Monroy et al., 2022).

Para el caso de hidrólisis concentrada, es un método más práctico y eficaz que el anterior siendo el más prometedor, implica el uso de temperaturas moderadas inferiores a 50°C por la acción de bombeo de materiales de un recipiente a otro; para el tiempo de reacción dependerá de la biomasa, pero de manera general se encuentra entre los 30 a 90 minutos (Monroy et al., 2022). La ventaja más destacada de esta técnica está en su rendimiento de conversión de azúcares libres en un 90%, produciendo menor cantidad de sustancias inhibitoras; sin embargo, entre sus desventajas exige emplear mayores cantidades de concentración de ácido entre 30 a 70%, lo que se traduce en incrementar los costos operacionales y emplear tecnología avanzada como alternativa para reciclar los ácidos (Hassan et al., 2021).

9 Proceso de hidrólisis enzimática

El proceso consiste en someter la biomasa a un pretratamiento para obtener fracciones celulósicas que, mediante reacciones químicas catalizadas por enzimas, se transforman en glucosa. Esta glucosa se fermenta para producir bioetanol u otros derivados químicos. Las enzimas celulolíticas, como celulasas y hemicelulasas, se obtienen de microorganismos como *Clostridium*, *Thermomonospora*, *Trichoderma* y *Aspergillus*, siendo *Trichoderma* el más destacado por su capacidad de producir altas concentraciones de enzimas hasta 100 g/L, lo que lo hace ideal para la producción industrial (Imran et al., 2016).

Durante la hidrólisis enzimática, las celulasas convierten la celulosa en glucosa y las hemicelulasas descomponen la hemicelulosa en azúcares como xilosa. Este proceso se realiza a temperaturas de 40-60 °C y un pH de 4.5 a 6.0 para maximizar la producción de azúcares

fermentables (hexosas y pentosas). Los azúcares liberados se fermentan con microorganismos como levaduras, produciendo bioetanol. La hidrólisis enzimática ofrece ventajas como mayor selectividad, generación de menos subproductos inhibidores, operación a condiciones más suaves que reducen el consumo energético y menor impacto ambiental al evitar productos químicos agresivos (Wojtusik, 2019).

Así mismo las principales limitaciones que presenta este proceso es conseguir la estabilidad de las enzimas, la inhibición del sustrato/producto que se puede presentar y la eficiencia catalítica, adicionalmente se deben emplear tecnologías avanzadas y de alto costo para reciclar y reutilizar las enzimas siendo así que mejorar las condiciones de pH, temperatura, concentración del sustrato y la carga de enzimas puede mejorar el rendimiento de monosacáridos obtenidos (Melendez et al., 2022; Sarkar et al., 2012). A continuación, se refleja de manera resumida en la **Figura 2** todo el proceso de obtención de bioetanol, adicionalmente la **Tabla 5** presenta un análisis sobre las principales ventajas y desventajas de los procesos de hidrólisis ácida y enzimática respectivamente.

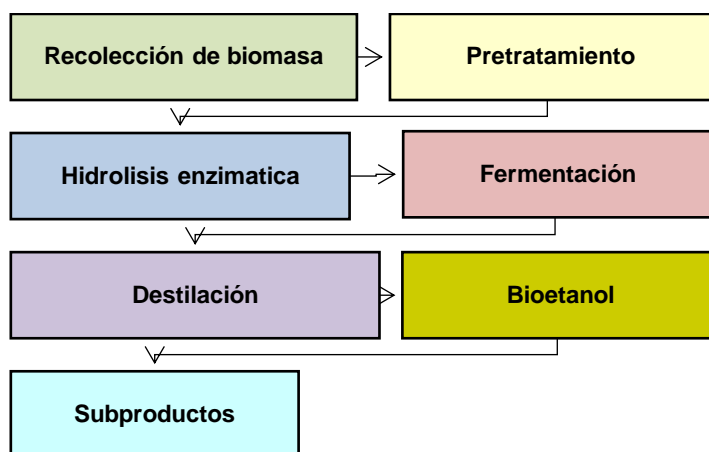


Figura 2. Proceso de obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica.

Elaborado por (Los autores, 2024)

9.1.1 Clasificación de celulasas

Las celulasas se clasifican generalmente en tres tipos principales, según su función en la degradación de la celulosa tal como se detalla en la **Tabla 4**:

Tabla 4. Clasificación de celulasas para el proceso de hidrólisis.

Clasificación	Función
Celulasas endo- β -1,4-glucanasas	➤ Actúan rompiendo enlaces glucosídicos internos en la cadena de celulosa, lo que produce fragmentos de menor tamaño.
Celulasas exo- β -1,4-glucanasas	➤ Remueven unidades de glucosa de los extremos de las cadenas de celulosa.
β -glucosidasa	➤ Es crucial para evitar la acumulación de celobiosa, que puede inhibir la actividad de otras celulasas.

Elaborado por (Los autores, 2024)

9.1.2 Grados de Concentración de las Enzimas

La concentración de las enzimas es un factor crítico en la hidrólisis enzimática y puede variar dependiendo de la materia prima y las condiciones del proceso. Por lo cual, se utilizan las siguientes concentraciones:

Concentraciones bajas 0.1-5 g/L varían de acuerdo para procesos donde se busca un equilibrio entre costo y eficiencia, a menudo en condiciones óptimas de pH y temperatura, concentraciones moderadas 5-15 g/L son utilizadas cuando la biomasa es más difícil de descomponer, se necesita una mayor cantidad de enzimas para asegurar una hidrólisis eficiente, concentraciones altas 15-30 g/L o más que se emplean en procesos industriales donde se requiere una rápida conversión de biomasa y donde los costos de las enzimas son menos críticos. Sin embargo, concentraciones excesivas pueden llevar a inhibiciones y no necesariamente a un aumento lineal en el rendimiento. El tiempo de reacción en la hidrólisis enzimática es un factor crítico que influye en la eficiencia de la conversión de biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables y puede variar según varios factores como la naturaleza de la biomasa, la concentración de las enzimas y las condiciones de operación, incluyendo temperatura y pH (Wojtusik, 2019).

Generalmente, el tiempo de reacción se clasifica en tres categorías, cortos (2-6 horas), donde en condiciones óptimas y con altas concentraciones de enzimas se pueden lograr rendimientos significativos; moderados (24-72 horas), que es más habitual en procesos

industriales que buscan un equilibrio entre rendimiento y costo, permitiendo que las enzimas actúen durante un período más largo en biomasa más resistente, y prolongados (más de 72 horas), necesario en biomasa particularmente recalcitrante, donde el proceso se extiende a varios días para permitir que las enzimas descompongan adecuadamente los enlaces glucosídicos. Aunque un tiempo de reacción más prolongado puede mejorar la conversión, también puede haber un punto de disminución de rendimientos debido a la degradación de los azúcares liberados o la inhibición por subproductos generados, lo que hace que la optimización del tiempo de reacción sea crucial para alcanzar un balance adecuado entre eficiencia y viabilidad económica en la producción de biocombustibles y otros productos biotecnológicos (Wojtusik, 2019).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los tipos de hidrólisis.

Tipo de Hidrólisis	Ventajas	Desventajas
Hidrólisis ácida diluida	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menores concentraciones de ácido. ➤ Tiempos de reacción relativamente cortos. ➤ Proceso rápido y sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Necesita de altas temperaturas y presiones. ➤ Produce un menor rendimiento. ➤ Genera compuestos inhibidores.
Hidrólisis ácida concentrada	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mayor conversión y rendimiento. ➤ Mejora la velocidad de reacción. ➤ Utiliza temperaturas moderadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Requiere de mayores concentraciones. ➤ Altamente costosa. ➤ Provoca corrosión en equipos. ➤ Empleo de tecnologías avanzadas para reciclar ácidos.

Hidrólisis enzimática	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Menor consumo energético de utilización. ➤ Produce menos productos inhibidores. ➤ Tiene mejores rendimientos que la hidrólisis ácida. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tiempos de reacción largos para obtener mejor rendimiento. ➤ Costos elevados en generación de enzimas y reciclado. ➤ Deben mejorarse las condiciones a las cuales son sometidas las enzimas.
------------------------------	---	--

Elaborado por (Los autores, 2024)

10 Fermentación y microorganismos participantes

La fermentación es un proceso de tipo biológico realizado por la acción de microorganismos que transforman azúcares de interés como glucosa, fructosa y sacarosa en energía celular para producir bioetanol como principal producto y dióxido de carbono como producto secundario (Jayakumar et al., 2023). En la actualidad existen diferentes técnicas para la fermentación como ejemplo la propia hidrólisis o sacarificación y la fermentación separada (SFH), este último utiliza la biomasa pretratada que pasa por un biorreactor para ser hidrolizado descomponiendo los azúcares. Una vez finalizado, la materia prima es trasladada a otra unidad para continuar la fermentación para la producción de bioetanol final (Sharma et al., 2020; Velasco y Burgos, 2020).

Otras técnicas como la sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) son las más indicadas para la generación de bioetanol, ya que combinan la hidrólisis enzimática y fermentación en la misma unidad de biorreactor. Sin embargo, existen algunas desventajas en su uso, atribuidos a la diferencia de temperaturas para sacarificación y fermentación. Por una parte, la hidrólisis necesita altas temperaturas, mientras que los microorganismos fermentadores pueden ser inhibidos a estas temperaturas (Ndubuisi et al., 2020).

En la sacarificación y cofermentación simultáneas (SSCF), la hidrólisis y la fermentación pueden ocurrir en la misma unidad de biorreactor con la cofermentación de azúcares pentosas,

esta técnica es adecuada para lignocelulósicos abundantes en xilosa, aunque el rendimiento de etanol es un 35% menor (Bondesson y Galbe, 2016). Otra técnica es el bioprocesamiento consolidado CBP, en donde la hidrólisis enzimática y la fermentación tienen lugar en el mismo reactor empleando una sola cepa. Las bacterias termófilas anaeróbicas celulolíticas son las más utilizadas, entre las especies más destacadas se encuentran *Thermoanaerobium mathranii*, *T. ethanolicus*, *T. brockii*, y hongos filamentosos como *Fusarium oxysporum* (Lugani et al., 2020). De esta manera en la **Figura 3** se puede observar una representación de cada tipo de fermentación.

Entre los microorganismos más efectivos que pueden participar en los procesos de fermentación son, *Saccharomyces cerevisiae* siendo la levadura convencional más empleada a nivel industrial para la producción de bioetanol. Esta levadura es capaz de crecer en un amplio rango de pH, lo que reduce las probabilidades de contaminación (Malik et al., 2022). La *S. cerevisiae* modificada genéticamente en la cepa (LNHS-ST 424 A) tiene la capacidad de metabolizar xilosa y glucosa para producir bioetanol con un rendimiento aproximado de 2,08 g/L debido a la sobreexpresión de su gen XYL2 (He et al., 2022).

Otros microorganismos con gran potencial son representados por otras especies de levaduras de *Saccharomyces* y *Pichia*, además de otros géneros de hongos como *Rhizopus*, *Mucor* y *Rhizomucor* y bacterias como *E. coli* y *Zymomonas mobilis*, que son participes en la fermentación de biomasa lignocelulósica, siendo que el pH óptimo de la mayoría de los microorganismos fermentativos se encuentra en rangos de 4,0 a 5,0 a temperaturas que pueden alcanzar los 45°C, los parámetros pueden variar en función de la materia prima y su pretratamiento. La utilización de azúcares C6 y la resistencia de inhibidores pueden cambiarse mediante la adición de microorganismos modificados genéticamente (Malik et al., 2022). A continuación, se muestra la **Tabla 6** con algunas materias primas agrícolas residuales y su rendimiento en bioetanol, por varias cepas de levaduras.

Tabla 6. Producción de bioetanol a partir de materias primas lignocelulósicas bajo diferentes tipos de fermentación y las cepas utilizadas.

Tipo de materia prima residual	Tipo de enzima hidrolítica	Tipo de fermentación	Microorganismo utilizado en la fermentación	Rendimiento de bioetanol (g/L)	Referencias
Purín de maíz	Celulasas	Sacarificación y fermentación simultánea	<i>K. marxianus</i> CICC 1727-5	52	(Du et al., 2020)
Granos gastados de cerveceros	Célula CTec2	Sacarificación y cofermentación simultánea	<i>S. cerevisiae</i> <i>S. stipitis</i>	38	(Rojas-Chamorro et al., 2020)
Fibras de coco	Celulasas	Sacarificación y fermentación simultáneas	<i>S. cerevisiae</i>	8,65	(Ebrahimi et al., 2021)
Tallo de algodón	Celulasas	Sacarificación y fermentación simultánea	<i>S. cerevisiae</i> YPH499, <i>P. tannophilus</i> 32.691	0,46	(Malik et al., 2021)
Paja de trigo	Ctec 2 y Celluclast 1.5	Hidrolisis y fermentación separada	<i>S. cerevisiae</i> NX11424	37	(Chen et al., 2021)

Elaborado por (Los autores)

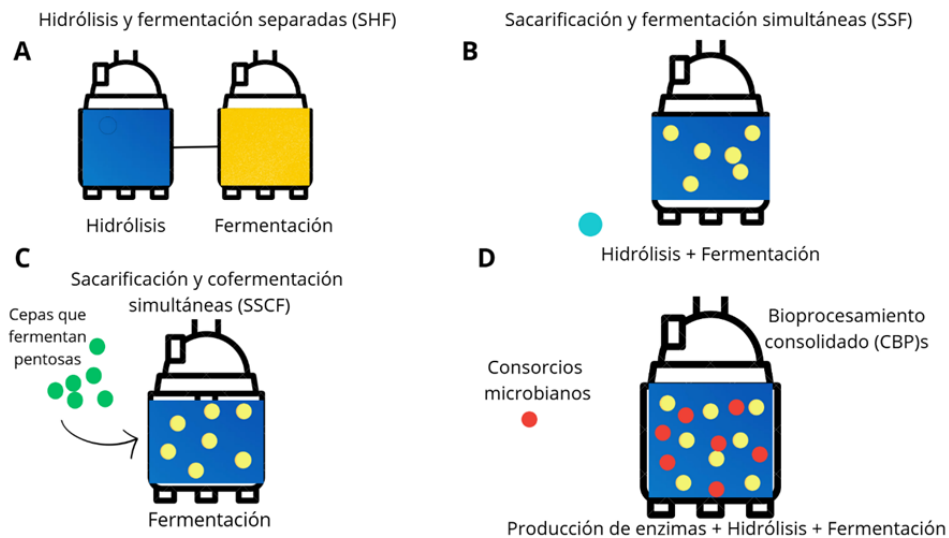


Figura 3. Tipos de fermentación.

Elaborado por (Los autores, 2024)

11 Destilación

La destilación es el paso final hacia la obtención de bioetanol, consiste en la separación de la mezcla líquida conformada por agua y bioetanol, mediante la aplicación de calor, por procesos de evaporación y condensación (Velasco y Burgos, 2020). De acuerdo con el principio de destilación, el etanol puede ser separado de una mezcla considerando la diferencia de volatilidades en los componentes (Robak y Balcerek, 2020). Para este proceso pueden aplicarse tres métodos convencionales, entre los cuales se encuentran la destilación azeotrópica, extracción líquido-líquido y destilación extractiva; también existen otras técnicas que están siendo objeto de estudio, como la pervaporación y la destilación de sal (Nagy et al., 2015; Sharma et al., 2020).

La técnica más utilizada es la destilación extractiva, debido a que su consumo energético es menor y se basa en utilizar un disolvente o también llamado agente separador. En el proceso se toma en cuenta su punto de ebullición y ser miscible con la mezcla. Una vez que es añadida a la mezcla azeotrópica altera la volatilidad del producto sin la formación de otras sustancias que puedan alterar el proceso; en este tipo de destilación pueden ser utilizadas sales disueltas como agente separador para la mezcla de etanol y agua (Sharma et al., 2020; Velasco y Burgos, 2020). En el proceso de destilación es importante considerar el calentamiento de la mezcla hasta el punto de ebullición del etanol 78,2 °C, este se evapora separándose del segundo componente agua (Aditiya et al., 2016).

12 Resultados y Discusión

12.1 Obtención de biocombustible de segunda generación y su impacto

La producción de biocombustibles de segunda generación, especialmente bioetanol, se posiciona como una alternativa más sostenible frente a los combustibles fósiles y los biocombustibles de primera generación. Esta categoría de biocombustibles utiliza materias primas lignocelulósicas provenientes de residuos agrícolas, lo que permite una reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre un 50 y 100% (Kargbo et al., 2021). Sin embargo, los procesos industriales para su producción, que incluyen pretratamiento, hidrólisis, fermentación y destilación, aún presentan altos costos y desafíos técnicos, destacando la necesidad de mejoras tecnológicas para maximizar su viabilidad económica y rendimiento.

El pretratamiento, etapa inicial crítica, depende del tipo de biomasa utilizada. Las tecnologías fisicoquímicas, como la explosión de vapor, han demostrado ser altamente eficientes y rentables, especialmente para residuos agrícolas. En la etapa de hidrólisis, un desafío importante es la conversión de hemicelulosas en pentosas, las cuales son menos fermentables que la glucosa proveniente de la celulosa. Además, las enzimas celulolíticas, obtenidas de bacterias y hongos, representan un costo elevado, aunque su reciclaje podría ser una estrategia efectiva para reducir los gastos operativos. Por su parte, la fermentación requiere una mejora en los microorganismos utilizados, siendo un área prometedora para la ingeniería genética, con el objetivo de incrementar su rendimiento y adaptabilidad (Su et al., 2020).

En términos ambientales, el aprovechamiento de residuos agrícolas evita su incineración o desecho, promoviendo su transformación en energía utilizable y disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles. Además, los subproductos generados, como lignina, pueden emplearse como abonos orgánicos, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y permitiendo su bioconversión en energía. Las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) también han resaltado la importancia de desarrollar tecnologías e infraestructuras limpias para la producción de bioetanol a gran escala. Este enfoque sostenible debe ser adoptado por empresas agroindustriales y químicas para garantizar la viabilidad de los procesos y su alineación con los objetivos de sostenibilidad global (Melendez et al., 2022).

El impacto global de los biocombustibles de segunda generación también está vinculado a la creciente demanda energética y el aumento poblacional. Según la (OCDE/FAO, 2017) las proyecciones de producción de bioetanol entre 2016 y 2026 muestran un incremento significativo, principalmente basado en el uso de cultivos como maíz y caña de azúcar. Este panorama refuerza la necesidad de continuar invirtiendo en tecnologías más eficientes y sustentables para atender la creciente demanda energética global, determinando el consumo previsto en el periodo de tiempo mencionado anteriormente como se muestra en la **Tabla 7** y en la **Figura 4**:

Tabla 7. Producción media mundial de etanol lignocelulósico desde 2016 hasta 2026 en gicalitros GL (10⁹L).

Producción de etanol lignocelulósico	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Producción mundial media	120	123,7	126,8	128,4	130,7	131,5	132,8	133,7	134,7	135,8	136,7
Materia prima a base de maíz	68,2	71,9	73,7	73,9	74,7	74,5	74,5	74,3	74,2	74,0	73,7
Materia prima a base de caña de azúcar	27,9	29,5	30,2	31,1	31,9	32,5	33,3	33,7	34,3	34,9	35,5
Consumo total	117,2	124,6	127,0	128,8	130,8	131,8	133,0	134,0	134,9	136,0	136,9

Elaborado por (Los autores, 2024) tomado de los datos de (OCDE/FAO, 2017)

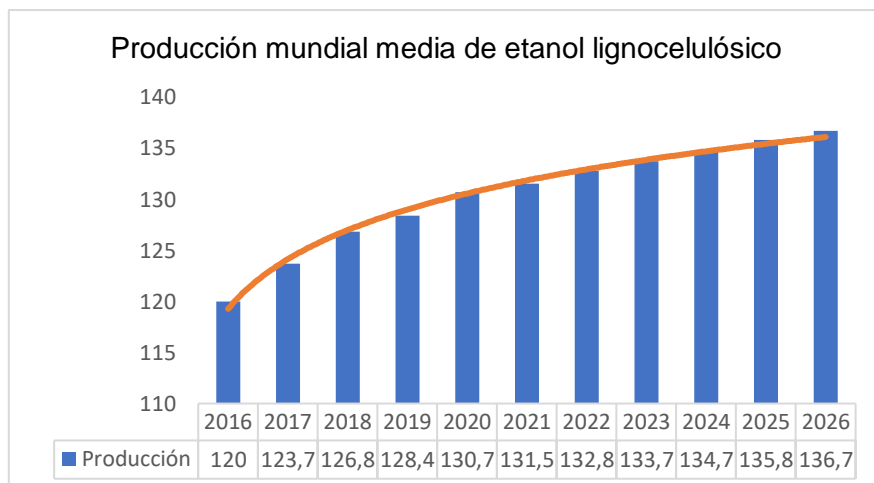


Figura 4. Producción mundial media estimada de etanol lignocelulósico (2016 - 2026).

Elaborado por (Los autores, 2024)

Este análisis de la OCDE/FAO señala que la producción de bioetanol debería aumentar de 120 GL en 2016 a 137 GL (gigalitros) en 2026. Para ese año, se estima que el 55% de la producción provendrá de cultivos de maíz y el 35% de caña de azúcar. Sin embargo, el aprovechamiento de residuos para biocombustibles de segunda generación (2G) no tendrá una participación significativa debido a la falta de inversión en investigación y desarrollo tecnológico. Además, el consumo total de biocombustibles presenta un crecimiento exponencial, lo que exige aumentar la bioconversión de materias primas para satisfacer la demanda (Melendez et al., 2022; OCDE/FAO, 2017).

Sin embargo, los estudios de (Holmatov, 2021) revelan que el potencial del bioetanol 2G reside en países como China, EE. UU, India y Brasil debido a que estos países son grandes productores de maíz, arroz con cáscara, trigo, soja y plátanos. Adicionalmente, se resalta que la producción neta global de bioetanol se encuentra entre 7,1 a 34,0 EJ (Exajoule) por año, permitiendo sustituir entre el 7% y el 31% de productos a base de petróleo enfocados al transporte.

En conclusión, la producción de bioetanol de segunda generación representa un paso clave hacia una transición energética sostenible. Aunque se enfrenta a retos económicos y tecnológicos, el avance en procesos como el pretratamiento, la hidrólisis y la fermentación, así como la integración de evaluaciones de ciclo de vida, puede consolidar su papel como una solución viable para reducir las emisiones de GEI y promover la independencia energética. Esto lo convierte en un eje estratégico para satisfacer la demanda energética global de manera sustentable.

12.2 Comparación con otros biocombustibles

Los avances tecnológicos han impulsado el desarrollo de diversos biocombustibles, cada uno con características y aplicaciones específicas. Además del bioetanol de segunda generación, existen otros biocombustibles que juegan un papel crucial en la transición hacia una economía en bajas emisiones de carbono. La elección del biocombustible depende de factores como la disponibilidad de materia prima, la viabilidad económica y el rendimiento energético; estos factores han permitido el desarrollo de alternativas viables (Sikiru et al., 2024). En las investigaciones y revisiones de la última década se pueden destacar y brindar datos sobre la eficiencia en sostenibilidad y productividad de varios tipos de biomásas lignocelulósicas en los

biocombustibles más utilizados. La **Tabla 8** y los gráficos brindan un análisis comparativo sobre cual biocombustible tiene un mejor desempeño para implementar mejoras en el futuro.

Tabla 8. Análisis de diferentes tipos de materias primas lignocelulósicas con sus respectivos biocombustibles y producción.

Materia Primas Lignocelulósicas para Bioetanol	Pretratamiento utilizado	Metodología de conversión	Producción	Observaciones de rendimiento
Rastrojo de maíz	Sin pretratamiento	Sacarificación y fermentación simultánea	41,9 g/L	Mejorar tratamientos de biomasa
Paja de arroz	Hidrólisis enzimática	Fermentación	18,07 g/L	Baja eficiencia de conversión
Cáscaras de plátano	Hidrólisis enzimática	Fermentación	4,24 g/L	Niveles bajos de producto
Cáscaras de papa	Sin pretratamiento	Fermentación	21,7 g/L	Potencial de incremento de bioetanol
Maderas de palma	Químico	Sacarificación y fermentación	22,90 g/L	Cuidados puntuales sobre el tratamiento
Materias primas lignocelulósicas para Biodiésel	Pretratamiento utilizado	Metodología de conversión	Producción	Observaciones de rendimiento
Almidón de yuca	Hidrólisis enzimática	Fermentación	0,187 g/g	Bajo rendimiento de producto
Residuos de piña	Alcalina	Transesterificación	13 ml/l	Bajo rendimiento
Microalgas cultivadas en cáscara de plátano	Sin pretratamiento	Transesterificación	0,42 g/L	Alto rendimiento

Rastrojo de maíz	Ácida y enzimática	Transesterificación	2,2 g/g	Mejor tratamiento de biomasa
Microalgas cultivadas en bagazo de caña de azúcar	Químico	Transesterificación	0,112 g/L	Mejora de procesos
Materias Primas lignocelulósicas para biogás – biometano	Pretratamiento	Metodología de conversión	Producción	Observaciones de rendimiento
Hojas de remolacha	Enzimático	Digestión anaeróbica	0,516 g/L	Buenos rendimientos
Cáscaras de maní	Sin pretratamiento	Digestión anaeróbica	0,03107 g/L	Mejoras de tratamiento
Residuos de madera	Enzimático	Digestión anaeróbica	0,224 g/L	Baja descomposición de materia prima
Bagazo de caña de azúcar y jacintos de agua	Sin pretratamiento	Digestión anaeróbica	0,303 g/L	Requiere de mayores estudios
Materias Primas lignocelulósicas para biobutanol	Pretratamiento	Metodología de conversión	Producción	Observaciones de rendimiento
Hidrolizado de paja de cebada	Pretratamiento ácido	Fermentación ABE	30,86 g/L	Mejora los niveles de rendimiento
Hidrolizado de bagazo de yuca	Hidrólisis enzimática	Fermentación por lotes	76,40 g/L	Alto aprovechamiento de producto

Residuos de cáscara de naranja	Explosiones de vapor e hidrólisis	Fermentación discontinua	19,50 g/L	Requiere de mejoras de conversión
Paja de trigo	Biológico	Fermentación ABE	14,2 g/L	Procesos de bajo coste
bagazo de sorgo dulce	Hidrolisis enzimática	Fermentación	117 kg/g	Materia prima altamente productiva

Elaborado por (Los autores, 2024) adaptado en los datos de (Awogbemi y Kallon, 2022)

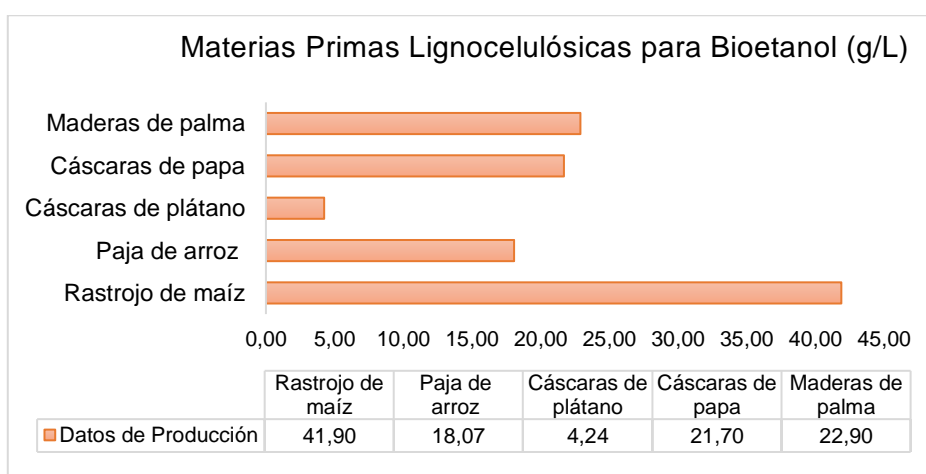


Figura 5. Generación de bioetanol a partir de residuos agrícolas.

Elaborado por (Los autores, 2024)

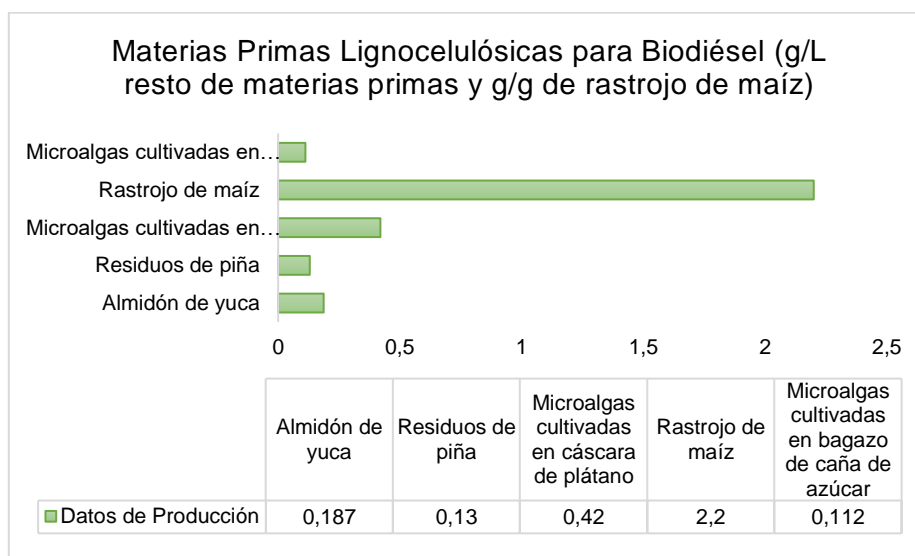


Figura 6. Generación de biodiésel a partir de residuos agrícolas.

Elaborado por (Los autores, 2024)

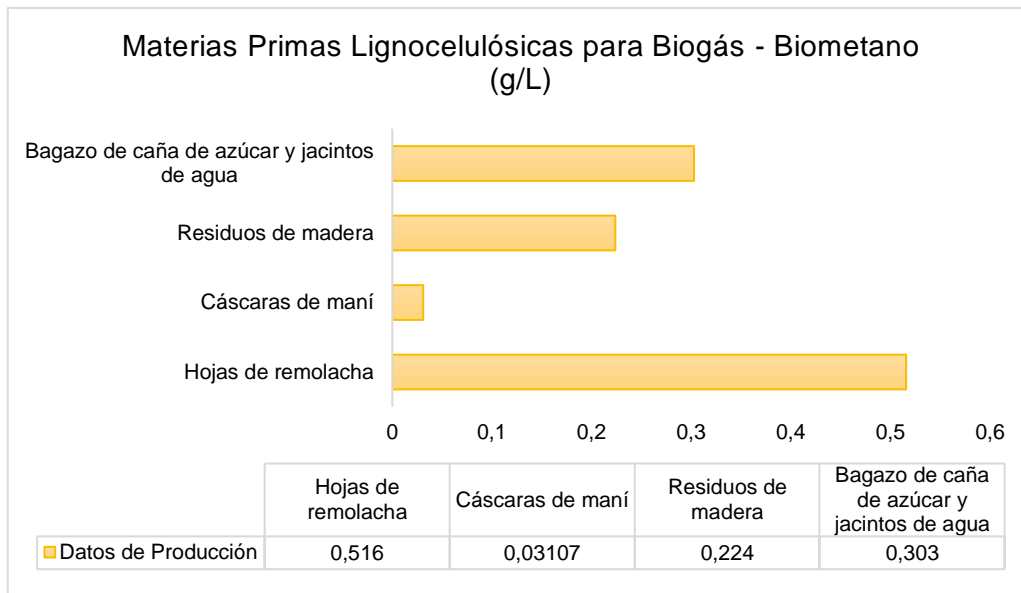


Figura 7. Generación de biogás - biometano a partir de residuos agrícolas.

Elaborado por (Los autores, 2024)

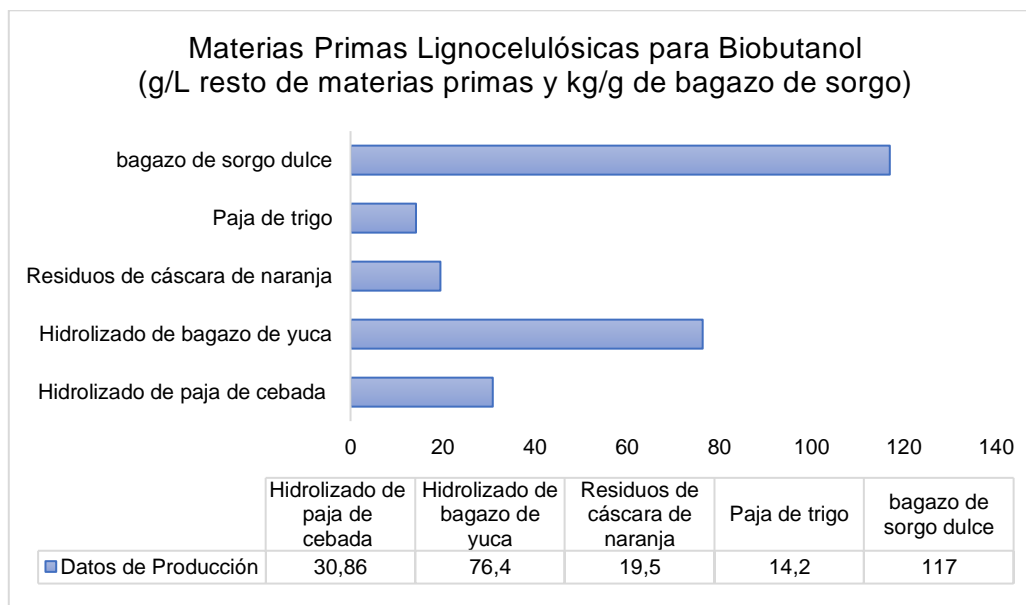


Figura 8. Generación de biobutanol a partir de residuos agrícolas.

Elaborado por (Los autores, 2024)

En términos de sostenibilidad y productividad, los biocombustibles lignocelulósicos han demostrado ser eficientes. Ejemplo de ello y en primera instancia se encuentra el biobutanol en la **Figura 8**. Los autores (Awogbemi y Kallon, 2022) en su recopilatorio de datos mencionan que este tipo de biocombustible contiene alto contenido de energía, elevados índices de octano y menor volatilidad lo que permite ser utilizado en motores de combustión interna. Sin embargo, el biobutanol tiene algunos inconvenientes en sus procesos fermentativos y la formación de

bioincrustaciones provocando que su producción se vuelva deficiente (Karthick y Nanthagopal, 2021).

A continuación, se resalta el bioetanol en la **Figura 5**, al mezclarse con gasolina, reduce significativamente las emisiones de dióxido de carbono y dióxido de azufre. Además, gracias a mejoras en pretratamientos, hidrólisis y uso de residuos agrícolas, su eficiencia de producción ha alcanzado hasta un 65%. Sin embargo, enfrenta desafíos como altos costos de producción y problemas asociados a la mezcla con gasolina, como la afinidad con el agua, que puede causar corrosión en los motores (Awogbemi et al., 2021; Barua et al., 2023).

Otro biocombustible destacado es el biometano de la **Figura 7**, utilizado principalmente para la generación de electricidad y como combustible para automóviles. Sus ventajas incluyen bajos costos de producción y autonomía energética. Sin embargo, presenta desventajas como emisiones de olores desagradables y un alto riesgo de explosión. A pesar de estas limitaciones, su uso sigue siendo una opción viable y eficiente (Awogbemi y Kallon, 2022; Orecchini et al., 2015).

El biodiésel en la **Figura 6**, por su parte, ofrece beneficios como la prolongación de la vida útil de los motores, menores emisiones de gases de efecto invernadero y una toxicidad baja. Sin embargo, no es adecuado para climas fríos debido al riesgo de gelificación, lo que puede obstruir motores y filtros. Actualmente, se investigan métodos de producción basados en microalgas y residuos agrícolas, aunque estos últimos aún presentan limitaciones tecnológicas (Awogbemi et al., 2021).

En conclusión, cada biocombustible tiene ventajas y desventajas específicas. El bioetanol y el biobutanol emergen como los más prometedores para investigaciones futuras, debido a su versatilidad y potencial para mejorar sus métodos de producción y superar las limitaciones actuales. Su desarrollo puede contribuir significativamente a una transición energética sostenible.

12.3 Comparación con combustibles fósiles

En términos de impacto ambiental, los biocombustibles tienen ventajas significativas. Emiten menos partículas y óxidos de azufre, y su producción permite aprovechar residuos orgánicos, reduciendo el desperdicio. En contraste, los combustibles fósiles generan mayores niveles de contaminantes atmosféricos, como dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, que

afectan gravemente la calidad del aire. Además, su uso y extracción producen residuos sólidos y líquidos que son difíciles de gestionar (Vasić et al., 2021).

En términos de contaminación, los bicombustibles emiten menos partículas y óxidos de azufre, además de aprovechar residuos orgánicos, reduciendo el desperdicio. En contraste, los combustibles fósiles producen mayores niveles de contaminantes, afectando la calidad del aire, y generan residuos sólidos y líquidos difíciles de gestionar, respecto a flexibilidad y escalabilidad, los bicombustibles se adaptan mejor a escalas locales y regionales, aunque están limitados por la disponibilidad de tierras cultivables y agua, de forma precisa se encuentra representado en los datos de la **Tabla 9**. Los combustibles fósiles, aunque sostenidos por infraestructuras masivas, enfrentan restricciones debido a la finitud de sus reservas y materias primas en comparación con los biocombustibles (Lamichhane et al., 2021). Las comparaciones se muestran en la **Tabla 10**, además la comparación gráfica se observa en la **Figura 9** y **Figura 10**.

Tabla 9. Comparación de aspectos relevantes de biocombustibles y combustibles fósiles.

Comparación	Biocombustibles	Combustibles Fósiles
Emisiones de CO₂	Reducción de 50-90% en comparación con fósiles, dependiendo del ciclo de vida.	Elevadas, con un promedio de 3 kg de CO ₂ por litro de gasolina o diésel.
Costo de Producción	\$0.50-\$1.20 por litro, varía según materias primas y región.	\$0.30-\$0.70 por litro, con fluctuaciones según mercado global.
Disponibilidad de Materias Primas	Depende de cultivos agrícolas y desechos, limitada por tierras y recursos hídricos.	Amplia, pero restringida a regiones con reservas de petróleo y gas.
Impacto Ambiental Local	Baja contaminación local; puede generar deforestación o uso intensivo de tierras.	Alta contaminación del aire y agua; contribución a la lluvia ácida.
Infraestructura Necesaria	Requiere adaptaciones mínimas para mezclas, infraestructuras nuevas para su producción.	Infraestructura global establecida para extracción, transporte y refinado.

Elaborado por (Los autores, 2024) adoptado de los datos de (Torroba y Orozco, 2023)

Tabla 10. Comparación de combustibles en materia prima, países productores y observaciones.

Tipo de Combustible	Materia Prima	Producción Anual Mundial	Principales Países Productores	Observaciones
Biocombustibles	Caña de azúcar	1,900 millones de toneladas	Brasil, India, China	Principal fuente de bioetanol; Brasil produce aproximadamente 715 millones de toneladas anuales.
	Maíz	1,200 millones de toneladas	Estados Unidos, China, Brasil	Fuente significativa de bioetanol; EE. UU. lidera con una producción considerable.
	Aceite de palma	77 millones de toneladas	Indonesia, Malasia, Tailandia	Utilizado para biodiésel; Indonesia es el mayor productor mundial.
	Aceite de soja	61 millones de toneladas	Estados Unidos, Brasil, Argentina	Materia prima para biodiésel; producción concentrada en América.
	Residuos agrícolas	900 millones de toneladas	China, India, Brasil	Incluye paja de trigo, bagazo de caña; potencial para bioetanol celulósico.
	Madera y residuos forestales	500 millones de toneladas	Canadá, Suecia, Finlandia	Fuente de bioetanol y biocombustibles avanzados.

Combustibles Fósiles	Petróleo crudo	4,400 millones de toneladas	Arabia Saudita, Estados Unidos, Rusia	Base para gasolina y diésel, producción global significativa.
	Gas natural	4,036 mil millones de m ³	Estados Unidos, Rusia, Irán	Utilizado para calefacción y electricidad, reservas abundantes.
	Carbón	7,600 millones de toneladas	China, India, Estados Unidos	Principalmente para generación eléctrica; alto impacto ambiental.

Elaborado por (Los autores, 2024) adoptado de los datos de (Atlas, 2022) y (Torroba y Orozco, 2023)

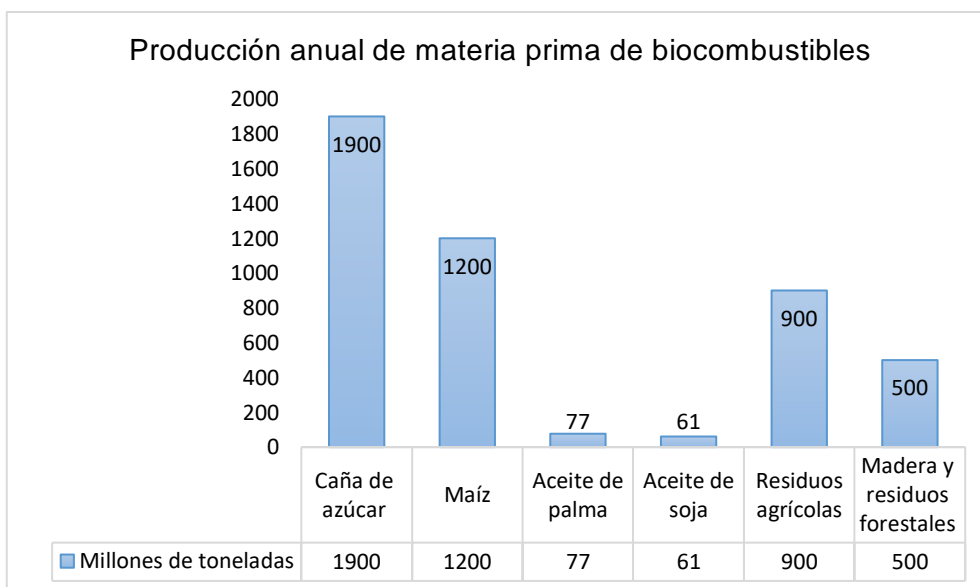


Figura 9. Producción anual de materia prima para biocombustibles de 2023.

Elaborado por (Los autores, 2024)

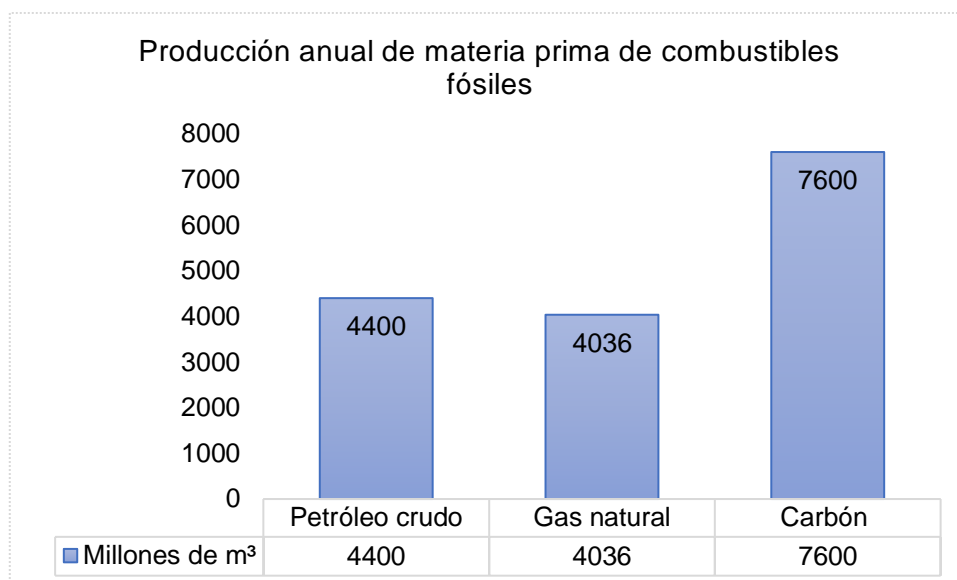


Figura 10. Producción anual de materia prima para combustibles fósiles de 2023.

Elaborado por (Los autores, 2024)

13 Conclusiones y perspectivas futuras

La elección de biomasa adecuada es fundamental para la producción de bioetanol. Es así que los residuos agrícolas como el bagazo de caña y la paja de trigo destacan por sus altos rendimientos de etanol, lo que permite aprovechar subproductos del sector agroindustrial y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, su composición plantea desafíos técnicos que requieren soluciones innovadoras para desarrollar mejoras en los procesos de conversión y maximizar su viabilidad económica. El pretratamiento de la biomasa juega un papel clave, ya que mejora la accesibilidad de las enzimas a la celulosa, incrementa la eficiencia del proceso y minimiza la generación de inhibidores que afectan la fermentación.

Al optimizar estos procedimientos se pueden reducir costos operativos y disminuir el impacto ambiental al evitar el uso excesivo de químicos agresivos. La combinación de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea representa una estrategia prometedora en la conversión de azúcares reduciendo los tiempos de procesamiento y renovando la rentabilidad del proceso, además, este enfoque fomenta la reutilización de residuos, contribuyendo a una producción más limpia y alineada con los principios de la bioeconomía circular.

Desde una perspectiva económica, el desarrollo de tecnologías más eficientes permitirá disminuir costos de producción y aumentar la competitividad del bioetanol frente a los combustibles convencionales. La integración de procesos en sistemas tipo biorrefinerías maximiza su utilidad, generando no solo bioetanol, sino también productos de valor agregado

como bioplásticos, biogás y fertilizantes, lo que diversifica las fuentes de ingresos y brindando una mayor sostenibilidad financiera del sector. Además, los incentivos y regulaciones gubernamentales también pueden desempeñar un papel en el aumento de la adopción de la producción de bioetanol a partir de desechos. Los análisis de ciclo de vida también permitirían identificar impactos potenciales en una etapa temprana del diseño del proceso y brindaría la oportunidad de tomar decisiones con respecto a su sostenibilidad.

En términos ambientales, la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar combustibles fósiles con una fuente renovable y de menor impacto. Además, el aprovechamiento de residuos agrícolas disminuye la generación de desechos y la contaminación asociada a su disposición inadecuada.

En el futuro, la industria se enfocará en tres áreas principales: mejoras tecnológicas, económicas y ambientales. Se espera el desarrollo de métodos de pretratamiento más eficientes, sostenibles y económicos, junto con avances en ingeniería enzimática, como el diseño de enzimas optimizadas mediante técnicas de ingeniería genética, también permitirán incrementar la eficiencia en los procesos de bioconversión y reducir costos, igualmente el desarrollo de nuevas técnicas fermentativas en estado sólido (FES) en conjunto de la modificación genética de microorganismos, representan oportunidades clave para transformar el sector. Estas perspectivas no solo refuerzan el papel del bioetanol como alternativa energética sostenible, sino que también promueven un modelo de producción más eficiente, viable y respetuoso con el medio ambiente, facilitando la transición hacia una economía más verde y resiliente.

Referencias

- Abolore, R. S., Jaiswal, S. y Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. En *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>
- Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H. y Sebayang, A. H. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 66, pp. 631–653). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.015>
- Aguilar-Reynosa, A., Romani, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Garrote, G. y Ruiz, H. A. (2017). Comparison of microwave and conduction-convection heating autohydrolysis pretreatment for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 243, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.096>
- Akyol, Ç., Ince, O., Bozan, M., Ozbayram, E. G. y Ince, B. (2019). Biological pretreatment with *Trametes versicolor* to enhance methane production from lignocellulosic biomass: A metagenomic approach. *Industrial Crops and Products*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111659>
- Ashokkumar, V., Chandramughi, V. P., Kumar, G., Ngamcharussrivichai, C., Piechota, G., Iglński, B., Kothari, R. y Chen, W. H. (2024). Advancements in lignocellulosic biomass: A critical appraisal of fourth-generation biofuels and value-added bioproduct. En *Fuel* (Vol. 365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130751>
- Atlas. (2022). *Producción mundial de caña de azúcar por país*. https://www.atlasbig.com/es-mx/paises-por-produccion-de-cana-de-azucar?utm_source=chatgpt.com
- Awogbemi, O. y Kallon, D. V. Von. (2022). Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. En *Heliyon* (Vol. 8, Número 10). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>
- Awogbemi, O., Von Kallon, D. V., Onuh, E. I. y Aigbodion, V. S. (2021). An overview of the classification, production and utilization of biofuels for internal combustion engine applications. *Energies*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/en14185687>
- Bansod, S. P., Makwana, K., Sarangi, P. K. y Parikh, J. K. (2024). Advanced pretreatment processes for lignocellulosic biomass to biofuels production: Path towards circular bioeconomy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101514>
- Barua, S., Sahu, D., Sultana, F., Baruah, S. y Mahapatra, S. (2023). Bioethanol, internal combustion engines and the development of zero-waste biorefineries: an approach towards sustainable motor spirit. En *RSC Sustainability* (Vol. 1, Número 5, pp. 1065–1084). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3su00080j>

- Beluhan, S., Mihajlovski, K., Šantek, B. y Ivančić Šantek, M. (2023). The Production of Bioethanol from Lignocellulosic Biomass: Pretreatment Methods, Fermentation, and Downstream Processing. En *Energies* (Vol. 16, Número 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en16197003>
- Binod, P., Gnansounou, E., Sindhu, R. y Pandey, A. (2019). Enzymes for second generation biofuels: Recent developments and future perspectives. En *Bioresource Technology Reports* (Vol. 5, pp. 317–325). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.06.005>
- Bondesson, P. M. y Galbe, M. (2016). Process design of SSCF for ethanol production from steam-pretreated, acetic-acid-impregnated wheat straw. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0635-6>
- Broda, M., Yelle, D. J. y Serwańska, K. (2022). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. En *Molecules* (Vol. 27, Número 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
- Castro, R. C. de A. y Roberto, I. C. (2015). Effect of nutrient supplementation on ethanol production in different strategies of saccharification and fermentation from acid pretreated rice straw. *Biomass and Bioenergy*, 78, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.019>
- Chakraborty, P., Kumar, R., Chakraborty, S., Saha, S., Chattaraj, S., Roy, S., Banerjee, A., Tripathy, S. K., Kumar Ghosh, A. y Jeon, B. H. (2024). Technological advancements in the pretreatment of lignocellulosic biomass for effective valorization: A review of challenges and prospects. En *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 137, pp. 29–60). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.03.025>
- Chen, J., Wang, X., Zhang, B., Yang, Y., Song, Y., Zhang, F., Liu, B., Zhou, Y., Yi, Y., Shan, Y. y Lü, X. (2021). Integrating enzymatic hydrolysis into subcritical water pretreatment optimization for bioethanol production from wheat straw. *Science of the Total Environment*, 770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145321>
- Choi, J. H., Jang, S. K., Kim, J. H., Park, S. Y., Kim, J. C., Jeong, H., Kim, H. Y. y Choi, I. G. (2019). Simultaneous production of glucose, furfural, and ethanol organosolv lignin for total utilization of high recalcitrant biomass by organosolv pretreatment. *Renewable Energy*, 130, 952–960. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.052>
- Chong, L., Zhiyuan, S., Hongzhen, F., Chen, C., Junjie, L., Qiao, L., Jianhui, D., Huazheng, C., Hongmei, W., Hongbo, L., Qingze, J., Yanhong, F. y Yongchun, W. (2021). Effect of a promising CSESE pretreatment on the morphological structure and properties of jute fibers. *E3S Web of Conferences*, 252. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125202049>
- Dahunsi, S. O. (2019). Mechanical pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: Methane yield prediction from biomass structural components. *Bioresource Technology*, 280, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.006>

- Deivayanai, V. C., Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P. y Rangasamy, G. (2022). A comprehensive review on the biological conversion of lignocellulosic biomass into hydrogen: Pretreatment strategy, technology advances and perspectives. En *Bioresource Technology* (Vol. 365). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128166>
- Du, C., Li, Y., Zong, H., Yuan, T., Yuan, W. y Jiang, Y. (2020). Production of bioethanol and xylitol from non-detoxified corn cob via a two-stage fermentation strategy. *Bioresource Technology*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123427>
- Duque, A., Manzanares, P. y Ballesteros, M. (2017). Extrusion as a pretreatment for lignocellulosic biomass: Fundamentals and applications. En *Renewable Energy* (Vol. 114, pp. 1427–1441). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.050>
- Ebrahimi, M., Caparanga, A. R. y Villaflores, O. B. (2021). Weak base pretreatment on coconut coir fibers for ethanol production using a simultaneous saccharification and fermentation process. *Biofuels*, 12(3), 259–265. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1468979>
- Espinosa, M., López, L. y Casdelo, N. (2021). *Pretratamiento de biomásas lignocelulósicas: Breve revisión de los principales métodos utilizados.*
- Gill, M. K., Kocher, G. S. y Panesar, A. S. (2021). Optimization of acid-mediated delignification of corn stover, an agriculture residue carbohydrate polymer for improved ethanol production. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100029>
- Hassan, M. K., Chowdhury, R., Ghosh, S., Manna, D., Pappinen, A. y Kuittinen, S. (2021). Energy and environmental impact assessment of Indian rice straw for the production of second-generation bioethanol. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101546>
- He, B., Hao, B., Yu, H., Tu, F., Wei, X., Xiong, K., Zeng, Y., Zeng, H., Liu, P., Tu, Y., Wang, Y., Kang, H., Peng, L. y Xia, T. (2022). Double integrating XYL2 into engineered *Saccharomyces cerevisiae* strains for consistently enhanced bioethanol production by effective xylose and hexose co-consumption of steam-exploded lignocellulose in bioenergy crops. *Renewable Energy*, 186, 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.103>
- Holmatov, B., Schyns, J. F., Krol, M. S., Gerbens-Leenes, P. W. y Hoekstra, A. Y. (2021). Can crop residues provide fuel for future transport? Limited global residue bioethanol potentials and large associated land, water and carbon footprints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111417>
- Hu, Y., Du, H., Xu, L., Liang, C., Zhang, Y., Sun, Z., Lin, C. S. K., Wang, W. y Qi, W. (2023). Life cycle environmental benefits of recycling waste liquor and chemicals in production of lignocellulosic bioethanol. *Bioresource Technology*, 390. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129855>
- Imran, M., Anwar, Z., Irshad, M., Asad, M. J. y Ashfaq, H. (2016). Cellulase Production from Species of Fungi and Bacteria from Agricultural Wastes and Its Utilization in Industry: A

- Review. *Advances in Enzyme Research*, 04(02), 44–55.
<https://doi.org/10.4236/aer.2016.42005>
- Islam, M. K., Wang, H., Rehman, S., Dong, C., Hsu, H. Y., Lin, C. S. K. y Leu, S. Y. (2020). Sustainability metrics of pretreatment processes in a waste derived lignocellulosic biomass biorefinery. En *Bioresource Technology* (Vol. 298). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122558>
- Jayakumar, M., Gindaba, G. T., Gebeyehu, K. B., Periyasamy, S., Jabesa, A., Baskar, G., John, B. I. y Pugazhendhi, A. (2023). Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review. En *Science of the Total Environment* (Vol. 879). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163158>
- Joseph, A. M., Tulasi, Y., Shrivastava, D. y Kiran, B. (2023). Techno-economic feasibility and exergy analysis of bioethanol production from waste. *Energy Conversion and Management: X*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100358>
- Kandasamy, M., Hamawand, I., Bowtell, L., Seneweera, S., Chakrabarty, S., Yusaf, T., Shakoor, Z., Algayyim, S. y Eberhard, F. (2017). Investigation of ethanol production potential from lignocellulosic material without enzymatic hydrolysis using the ultrasound technique. *Energies*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/en10010062>
- Karagoz, P., Bill, R. M. y Ozkan, M. (2019). Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations. En *Renewable Energy* (Vol. 143, pp. 741–752). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>
- Kargbo, H., Harris, J. S. y Phan, A. N. (2021). “Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 135). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110168>
- Karthick, C. y Nanthagopal, K. (2021). A comprehensive review on ecological approaches of waste to wealth strategies for production of sustainable biobutanol and its suitability in automotive applications. En *Energy Conversion and Management* (Vol. 239). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114219>
- Kassaye, S., Pant, K. K. y Jain, S. (2016). Synergistic effect of ionic liquid and dilute sulphuric acid in the hydrolysis of microcrystalline cellulose. En *Fuel Processing Technology* (Vol. 148, pp. 289–294). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.032>
- Khoshkho, S. M., Mahdavian, M., Karimi, F., Karimi-Maleh, H. y Razaghi, P. (2022). Production of bioethanol from carrot pulp in the presence of *Saccharomyces cerevisiae* and beet molasses inoculum; A biomass based investigation. *Chemosphere*, 286.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131688>
- Kumar, A. K. y Sharma, S. (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. En *Bioresources and Bioprocessing* (Vol. 4, Número

- 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
- Kumar, B., Bhardwaj, N., Agrawal, K., Chaturvedi, V. y Verma, P. (2020). Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept. En *Fuel Processing Technology* (Vol. 199). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244>
- Kumar, R., Strezov, V., Weldekidan, H., He, J., Singh, S., Kan, T. y Dastjerdi, B. (2020). Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 123). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>
- Lamichhane, G., Acharya, A., Poudel, D. K., Aryal, B., Gyawali, N., Niraula, P., Phuyal, S. R., Budhathoki, P., Bk, G. y Parajuli, N. (2021). Recent advances in bioethanol production from Lignocellulosic biomass. En *International Journal of Green Energy* (Vol. 18, Número 7, pp. 731–744). Bellwether Publishing, Ltd.
<https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1880910>
- Lu, H., Zhang, L., Yan, M., Wang, K. y Jiang, J. (2022). Screw extrusion pretreatment for high-yield lignocellulose nanofibrils (LCNF) production from wood biomass and non-wood biomass. *Carbohydrate Polymers*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118897>
- Lugani, Y., Rai, R., Prabhu, A. A., Maan, P., Hans, M., Kumar, V., Kumar, S., Chandel, A. K. y Sengar, R. S. (2020). Recent advances in bioethanol production from lignocelluloses: a comprehensive review with a focus on enzyme engineering and designer biocatalysts. *Biofuel Research Journal*, 7(4), 1267–1295. <https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.4.5>
- Luzardo Gorozabel, B. P., Ruíz Reyes, E. y Pérez Parra, J. C. (2023). TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(ESPECIAL), 3–22.
<https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>
- Mahmud, N. y Rosentrater, K. A. (2021). Low Moisture Anhydrous Ammonia Pretreatment of Four Lignocellulosic Materials—Distillers Dried Grains With Solubles, Corn Gluten Feed, Corn Fiber, and Oil Palm Frond. *Frontiers in Energy Research*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.682522>
- Malik, K., Salama, E. S., El-Dalatony, M. M., Jalalah, M., Harraz, F. A., Al-Assiri, M. S., Zheng, Y., Sharma, P. y Li, X. (2021). Co-fermentation of immobilized yeasts boosted bioethanol production from pretreated cotton stalk lignocellulosic biomass: Long-term investigation. *Industrial Crops and Products*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113122>
- Malik, K., Sharma, P., Yang, Y., Zhang, P., Zhang, L., Xing, X., Yue, J., Song, Z., Nan, L., Yujun, S., El-Dalatony, M. M., Salama, E. S. y Li, X. (2022). Lignocellulosic biomass for bioethanol: Insight into the advanced pretreatment and fermentation approaches. En *Industrial Crops and Products* (Vol. 188). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115569>

- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A. y Pant, K. K. (2021a). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. En *Bioresource Technology* (Vol. 334). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A. y Pant, K. K. (2021b). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. En *Bioresource Technology* (Vol. 334). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Mardina, P., Irawana, C., Dharma Putra, M., Bella Priscillaa, S. y Fatyasari Nata, I. (2021). *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi 24 (1) (2021):1-8 Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi 24 (1) (2021): 1-8* »«14**.-• »•? *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Journal of Scientific and Applied Chemistry Bioethanol Production from Cassava Peel Treated with Sulfonated Carbon Catalyzed Hydrolysis H) Check for updates.* <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ksahttps://doi.Org/io.i47io/jksa.24.i.i-Q>
- Melendez, J. R., Mátyás, B., Hena, S., Lowy, D. A. y El Salous, A. (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 160). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112260>
- Meng, F., Dornau, A., Mcqueen Mason, S. J., Thomas, G. H., Conradie, A. y McKechnie, J. (2021). Bioethanol from autoclaved municipal solid waste: Assessment of environmental and financial viability under policy contexts. *Applied Energy*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117118>
- Mikulski, D. y Kłosowski, G. (2018). Efficiency of dilute sulfuric acid pretreatment of distillery stillage in the production of cellulosic ethanol. *Bioresource Technology*, 268, 424–433. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.005>
- Monroy, A., Martínez Z, J. J. y Caicedo Pineda, G. A. (2022). Estrategias de aprovechamiento del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) hacia la producción de bioetanol. *Ciencia en Desarrollo*, 13(2), 185–200. <https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n2.2022.14088>
- Nagy, E., Mizsey, P., Hancsók, J., Boldyryev, S. y Varbanov, P. (2015). Analysis of energy saving by combination of distillation and pervaporation for biofuel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.010>
- Ndubuisi, I. A., Qin, Q., Liao, G., Wang, B., Moneke, A. N., Ogbonna, J. C., Jin, C. y Fang, W. (2020). Effects of various inhibitory substances and immobilization on ethanol production efficiency of a thermotolerant *Pichia kudriavzevii*. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01729-5>
- Niño López, L., Cárdenas, A. A. y Zambrano, R. G. (2013). Evaluación de pretratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) Evaluation of chemical pretreatments for enzymatic hydrolysis of lignocellulosic residues cassava (*Manihot esculenta* Crantz). En *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N. 069*.

- OCDE/FAO. (2017). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2026*. OECD.
https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-es
- Orecchini, F., Santiangeli, A. y Zuccari, F. (2015). Biomethane use for automobiles towards a CO₂-neutral energy system Graphic abstract. *Energy Procedia*, 81, 124–140.
<https://doi.org/10.1016/j>
- Palacios, S., Ruiz, H. A., Ramos-Gonzalez, R., Martínez, J., Segura, E., Aguilar, M., Aguilera, A., Michelena, G., Aguilar, C. y Ilyina, A. (2017). Comparison of physicochemical pretreatments of banana peels for bioethanol production. *Food Science and Biotechnology*, 26(4), 993–1001. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0128-9>
- Paredes Medina, D., Álvarez Núñez, M. y Ordoñez, M. S. (2010). Obtención de Enzimas Celulasas por Fermentación Sólida de Hongos para ser Utilizadas en el proceso de obtención de bioalcohol de residuos del cultivo de banano. En *Revista Tecnológica ESPOL-RTE* (Vol. 23, Número 1). Diciembre.
- Pendse, D. S., Deshmukh, M. y Pande, A. (2023). Different pre-treatments and kinetic models for bioethanol production from lignocellulosic biomass: A review. En *Heliyon* (Vol. 9, Número 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16604>
- Periyasamy, S., Beula Isabel, J., Kavitha, S., Karthik, V., Mohamed, B. A., Gizaw, D. G., Sivashanmugam, P. y Aminabhavi, T. M. (2023). Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol – A review. *Chemical Engineering Journal*, 453. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139783>
- Philippini, R. R., Martiniano, S. E., Chandel, A. K., de Carvalho, W. y da Silva, S. S. (2019). Pretreatment of Sugarcane Bagasse from Cane Hybrids: Effects on Chemical Composition and 2G Sugars Recovery. *Waste and Biomass Valorization*, 10(6), 1561–1570.
<https://doi.org/10.1007/s12649-017-0162-0>
- Rai, A. K., Al Makishah, N. H., Wen, Z., Gupta, G., Pandit, S. y Prasad, R. (2022). Recent Developments in Lignocellulosic Biofuels, a Renewable Source of Bioenergy. En *Fermentation* (Vol. 8, Número 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/fermentation8040161>
- Raud, M., Rocha-Meneses, L., Lane, D. J., Sippula, O., Shurpali, N. J. y Kikas, T. (2021). Utilization of barley straw as feedstock for the production of different energy vectors. *Processes*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/pr9040726>
- Rezania, S., Oryani, B., Cho, J., Talaiekhosravi, A., Sabbagh, F., Hashemi, B., Rupani, P. F. y Mohammadi, A. A. (2020). Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview. *Energy*, 199.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117457>
- Robak, K. y Balcerek, M. (2020). Current state-of-the-art in ethanol production from lignocellulosic feedstocks. En *Microbiological Research* (Vol. 240). Elsevier GmbH.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126534>

- Rojas-Chamorro, J. A., Romero-García, J. M., Cara, C., Romero, I. y Castro, E. (2020). Improved ethanol production from the slurry of pretreated brewers' spent grain through different co-fermentation strategies. *Bioresource Technology*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122367>
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S. y Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. En *Renewable Energy* (Vol. 37, Número 1, pp. 19–27). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>
- Selvakumar, P., Adane, A. A., Zelalem, T., Hunegnaw, B. M., Karthik, V., Kavitha, S., Jayakumar, M., Karmegam, N., Govarathanan, M. y Kim, W. (2022). Optimization of binary acids pretreatment of corncob biomass for enhanced recovery of cellulose to produce bioethanol. *Fuel*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124060>
- Sharma, B., Larroche, C. y Dussap, C. G. (2020). Comprehensive assessment of 2G bioethanol production. En *Bioresource Technology* (Vol. 313). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123630>
- Sikiru, S., Abioye, K. J., Adedayo, H. B., Adebukola, S. Y., Soleimani, H. y Anar, M. (2024). Technology projection in biofuel production using agricultural waste materials as a source of energy sustainability: A comprehensive review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 200). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114535>
- Singh, B., Kumar, P., Yadav, A. y Datta, S. (2019). Degradation of fermentation inhibitors from lignocellulosic hydrolysate liquor using immobilized bacterium, *Bordetella* sp. BTIITR. *Chemical Engineering Journal*, 361, 1152–1160. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.168>
- Singh, S., Kumar, A., Sivakumar, N. y Verma, J. P. (2022). Deconstruction of lignocellulosic biomass for bioethanol production: Recent advances and future prospects. *Fuel*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125109>
- Su, T., Zhao, D., Khodadadi, M. y Len, C. (2020). Lignocellulosic biomass for bioethanol: Recent advances, technology trends, and barriers to industrial development. En *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 24, pp. 56–60). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.04.005>
- Toor, M., Kumar, S. S., Malyan, S. K., Bishnoi, N. R., Mathimani, T., Rajendran, K. y Pugazhendhi, A. (2020). An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125080>
- Torroba, A. y Orozco, R. (2023). El estado de los biocombustibles líquidos en las Américas, 2023. *ICCA*. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21981/BCO23129361e.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- Tsegaye, B., Balomajumder, C. y Roy, P. (2019). Optimization of microwave and NaOH pretreatments of wheat straw for enhancing biofuel yield. *Energy Conversion and Management*, 186, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.049>
- Tubiello, F. N., Karl, K., Flammini, A., Gütschow, J., Obli-Laryea, G., Conchedda, G., Pan, X., Qi, S. Y., Halldórudóttir Heiðarsdóttir, H., Wanner, N., Quadrelli, R., Rocha Souza, L., Benoit, P., Hayek, M., Sandalow, D., Mencos Contreras, E., Rosenzweig, C., Rosero Moncayo, J., Conforti, P. y Torero, M. (2022). Pre- and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems. En *Earth System Science Data* (Vol. 14, Número 4, pp. 1795–1809). Copernicus Publications. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1795-2022>
- Vasić, K., Knez, Ž. y Leitgeb, M. (2021). Bioethanol production by enzymatic hydrolysis from different lignocellulosic sources. En *Molecules* (Vol. 26, Número 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26030753>
- Vasilakou, K., Nimmegeers, P., Thomassen, G., Billen, P. y Van Passel, S. (2023). Assessing the future of second-generation bioethanol by 2030 – A techno-economic assessment integrating technology learning curves. *Applied Energy*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121263>
- Velasco, A. y Burgos, J. (2020). *UNA REVISIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULOSA*.
- Wojtusik, M. (2019). *Hidrólisis enzimática de materiales lignocelulósicos MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR*.
- Xu, N., Liu, S., Xin, F., Zhou, J., Jia, H., Xu, J., Jiang, M. y Dong, W. (2019). Biomethane production from lignocellulose: Biomass recalcitrance and its impacts on anaerobic digestion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7(AUG). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00191>
- Ye, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Wei, W., Cheng, D., Bui, X. T., Hoang, N. B. y Zhang, H. (2024). Biofuel production for circular bioeconomy: Present scenario and future scope. En *Science of the Total Environment* (Vol. 935). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172863>
- Yusuf, A. A. y Inambao, F. L. (2019). Bioethanol production from different Matooke peels species: A surprising source for alternative fuel. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.008>
- Zhai, R., Hu, J. y Jin, M. (2022). Towards efficient enzymatic saccharification of pretreated lignocellulose: Enzyme inhibition by lignin-derived phenolics and recent trends in mitigation strategies. En *Biotechnology Advances* (Vol. 61). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.108044>

Ziegler-Devin, I., Chrusciel, L. y Brosse, N. (2021). Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Mini-Review of Theoretical and Experimental Approaches. En *Frontiers in Chemistry* (Vol. 9). Frontiers Media S.A.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358>