

**Diseño de un fermentador para el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar y el
raquis de palma africana**

Adriana Martínez Roa

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Directora

Olga Lucía Bayona Ayala

Magister en Ingeniería Química

Codirectora

Angélica María Candela Soto

Doctora en Ciencias

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

2024

Dedicatoria

A Dios porque sus tiempos son perfectos y su amor es inmenso.

A mi padre Henry Martínez y mi madre Celmira Roa, por ser el motor de mi vida. Les agradezco infinitamente por todo el amor y apoyo que me brindan.

A mi hermano Henry Martínez Roa, por estar siempre para mí, a pesar de la distancia.

A mi tía Marilu Roa, por su paciencia y apoyo durante este camino.

A mi abuela Felisa López, por su amor y compañía.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi directora Olga Bayona por su paciencia durante todo el proceso de esta tesis. Su conocimiento y apoyo fueron fundamentales.

Agradezco profundamente a mi codirectora Angélica Candela por las innumerables horas que dedicó a revisar mi trabajo, por siempre estar dispuesta a resolver mis dudas con actitud positiva y constructiva.

Al grupo de investigación GINMEA, cuyo apoyo y colaboración han sido fundamentales en la realización de esta tesis, gracias por motivar en mí el espíritu de investigación.

A Anderson Afanador por haberme acompañado en cada paso de este desafiante y gratificante camino.

Agradezco profundamente a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de esta tesis.

Contenido

Introducción	12
1 Planteamiento del problema.....	13
2 Justificación	15
3 Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos	17
4 Marco referencial	17
4.1 Marco teórico	17
4.2 Estado del arte	23
4.3 Marco legal.....	25
5 Metodología y resultados.....	27
5.1 Revisión bibliográfica de los productos más representativos	27
5.1.1 Producción de biohidrógeno.....	28
5.1.2 Producción de biometano	30
5.1.3 Producción de bioetanol	32
5.1.4 Producción de biobutanol o butanol	34
5.2 Vigilancia tecnológica.....	35
5.2.1 Indicadores básicos.....	38
5.2.2 Índices de relación	45
5.3 Condiciones de operación del fermentador.....	53
5.3.1 Corriente de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar y raquis de palma africana	54
5.3.2 Definición de los parámetros de fermentación	58

5.4	Diseño mecánico del fermentador.....	60
5.4.1	Diseño del tanque de fermentación	61
5.4.2	Diseño del intercambiador de calor	65
5.4.3	Diseño del sistema de agitación.....	68
5.4.4	Diseño de la tapa.....	70
5.5	Evaluación teórica del proceso.....	72
5.5.1	Corriente de hidrolizado	73
5.5.2	Corriente de inóculo	74
5.5.3	Fermentación	75
5.5.4	Balance energético.....	77
6	Conclusiones	78
7	Recomendaciones.....	79
	Referencias	80

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Fracción promedio de biomasa lignocelulósica</i>	18
Tabla 2. <i>Resumen características de los métodos de producción de biohidrógeno</i>	28
Tabla 3. <i>Producción de fermentaciones ABE mediante Clostridium beijerinckii</i>	35
Tabla 4. <i>Ecuaciones de búsqueda con sus respectivos documentos recuperados de la base de datos Scopus</i>	36
Tabla 5. <i>Resumen de los diferentes autores que han modificado cepas con el fin de mejorar los rendimientos de butanol</i>	51
Tabla 6. <i>Caracterización del bagazo seco de caña de azúcar</i>	55
Tabla 7. <i>Caracterización fisicoquímica del raquis de palma africana en base seca</i>	57
Tabla 8. <i>Comparación producción de Butanol entre las cepas Clostridium beijerinckii y Clostridium saccharoperbutylaceticum</i>	58
Tabla 9. <i>Parámetros óptimos de cultivo Clostridium Saccharoperbutylaceticum NI-4</i>	59
Tabla 10. <i>Entalpía de reacción reacciones ABE</i>	66
Tabla 11. <i>Moles de productos generados para 5 litros</i>	66
Tabla 12. <i>Moles de glucosa consumidas dentro del proceso</i>	66
Tabla 13. <i>Calor generado o consumido dentro del proceso</i>	67
Tabla 14. <i>Composiciones de las corrientes de fermentados</i>	76
Tabla 15. <i>Masas y entalpías de las corrientes</i>	77

Lista de figuras

Figura 1. <i>Clasificación de los biocombustibles</i>	20
Figura 2. <i>Diseño metodológico</i>	27
Figura 3. <i>Publicaciones por año</i>	38
Figura 4. <i>Top 14 de la distribución por países según el número de publicaciones</i>	39
Figura 5. <i>Top 4 de la distribución por países de Latinoamérica según el número de publicaciones</i>	41
Figura 6. <i>Densidad de publicación por países</i>	42
Figura 7. <i>Top 21 de instituciones con más de dos publicaciones</i>	43
Figura 8. <i>Top 16 de autores con más de tres publicaciones</i>	44
Figura 9. <i>Palabras claves</i>	45
Figura 10. <i>Relación entre países</i>	46
Figura 11. <i>Relación entre palabras claves</i>	47
Figura 12. <i>Relación entre autores</i>	48
Figura 13. <i>Diagrama de proceso de fermentación ABE</i>	53
Figura 14. <i>Parámetros de diseño del agitador</i>	68
Figura 15. <i>Registro de componentes</i>	72
Figura 16. <i>Fermentación ABE en el Software SuperPro Designer</i>	73
Figura 17. <i>Registro de corriente de hidrolizado</i>	74
Figura 18. <i>Registro de corriente de inóculo</i>	75
Figura 19. <i>Registro del balance másico y molar de la reacción</i>	76

Resumen

El incremento de las emisiones globales de carbono y la creciente preocupación por los problemas ambientales, junto con los altos costos del petróleo, la inseguridad en el abastecimiento energético y los desafíos asociados al cambio climático, han generado un notable interés en el avance de fuentes de energía limpia.

Considerando esta problemática, se diseñó un biorreactor que evalúa el impacto energético, la eficiencia de conversión de los microorganismos y el potencial impacto ambiental al utilizar glucosa derivada de la hidrólisis de materiales lignocelulósicos como sustrato. Este enfoque apunta a la producción de productos de segunda generación, los cuales ofrecen múltiples beneficios al reducir la dependencia de combustibles fósiles. Además, responde de manera positiva a la creciente demanda global de energía, mejorando la seguridad energética sin comprometer la seguridad alimentaria y promoviendo el desarrollo sustentable mediante prácticas responsables.

En este contexto, la investigación aborda una revisión bibliográfica y análisis de datos a partir del uso de la herramienta Vantage Point con el objetivo de determinar el biocombustible con el mejor potencial de aprovechamiento, considerando su capacidad energética, el interés científico en los últimos años, alta productividad e impacto ambiental. Por tanto, se tomaron como referencia de estudio el biohidrógeno, biometano, bioetanol y biobutanol.

Una vez estudiados cada uno de los biocombustibles se determinó que el biobutanol muestra el mayor potencial energético, asimismo, se evidenció que en los últimos años el interés científico ha ido en aumento con grandes avances a la fecha, y un factor predominante que tiene el biobutanol sobre el bioetanol es una mayor facilidad de manejo, considerando que es menos higroscópico y que puede mezclarse con la gasolina en cualquier proporción, cosa que no puede realizarse con el bioetanol. Otro factor importante por el cual se eligió el biobutanol como biocombustible objetivo,

son los subproductos asociados al proceso, considerando que se generan compuestos de alto interés económico como Acetona, Ácido acético y el Ácido butírico que al considerarse en conjunto aumentan la viabilidad económica global del proceso productivo.

En aras de diseñar el biorreactor, se determinó que la cepa *Clostridium Saccharoperbutylacetonicum NI-4*, presenta el mejor potencial para la biosíntesis de butanol teniendo en cuenta su productividad, conversión de glucosa, tolerancia a los solventes y además de que al no producir etanol disminuye notablemente los gastos de separación de los subproductos valiosos.

Con la información obtenida de la ciencimetría y considerando el código americano de diseño ASME, se logró diseñar un biorreactor con una capacidad de 5 litros, para el estudio a escala laboratorio; para ello se llevaron a cabo 4 etapas; diseño del tanque de fermentación, diseño del intercambiador de calor, condiciones de operación y diseño del agitador, y las adaptaciones de corrientes de entrada y accesorios asociados al proceso.

Finalmente, se realizó la simulación en el programa SuperPro Designer siguiendo la estequiometría de la reacción reportada por Francisco Vela (Vela, 2008), tomando como temperatura y presión de operación 32°C y una atmósfera respectivamente. Obteniendo como resultado una concentración de poco más de 12 $\frac{g}{L}$ en la corriente de productos fermentados, para una concentración inicial de glucosa proveniente de hidrólisis de bagazo de caña de azúcar y raquis de palma africana de 50g/L.

Palabras clave: material lignocelulósico, fermentador, biocombustibles, bagazo de caña de azúcar, raquis de palma africana, productos, subproductos

Abstract

The increase in global carbon emissions and the growing concern over environmental issues, along with the high costs of oil, energy supply insecurity, and the challenges associated with climate change, have generated significant interest in advancing clean energy sources.

In response to these challenges, a bioreactor was designed to evaluate the energy impact, conversion efficiency of microorganisms, and potential environmental impact when using glucose derived from the hydrolysis of lignocellulosic materials as a substrate. This approach aims to produce second-generation products, which offer multiple benefits by reducing dependence on fossil fuels. Additionally, it positively addresses the growing global energy demand, enhances energy security without compromising food security, and promotes sustainable development through responsible practices.

In this context, the research involved a literature review and data analysis using the Vantage Point tool to determine the biofuel with the best potential, considering its energy capacity, scientific interest in recent years, high productivity, and environmental impact. Therefore, biohydrogen, biomethane, bioethanol, and biobutanol were selected as study references.

Upon studying each of these biofuels, it was determined that biobutanol exhibits the highest energy potential. Furthermore, it was noted that scientific interest in biobutanol has been increasing in recent years, with significant advancements to date. A key advantage of biobutanol over bioethanol is its easier handling, as it is less hygroscopic and can be mixed with gasoline in any proportion, which is not possible with bioethanol. Another important factor for selecting biobutanol as the target biofuel is the associated by-products, which include economically valuable compounds such as Acetone, Acetic Acid, and Butyric Acid, thereby increasing the overall economic viability of the production process.

To design the bioreactor, the strain *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 was identified as having the best potential for butanol biosynthesis, considering its productivity, glucose conversion, solvent tolerance, and the fact that it does not produce ethanol, which significantly reduces the costs of separating valuable by-products.

Using the information obtained from scientometrics and considering the American design code ASME, a bioreactor with a 5-liter capacity was designed for laboratory-scale studies. The design process involved four stages: the fermentation tank design, heat exchanger design, operating conditions, agitator design, and the adaptation of input streams and process-associated accessories. Finally, a simulation was conducted using the SuperPro Designer software, following the reaction stoichiometry reported by Francisco Vela (Vela, 2008), with an operating temperature and pressure of 32°C and one atmosphere, respectively. The result was a concentration of just over 12 g/L in the fermented product stream, starting with an initial glucose concentration from the hydrolysis of sugarcane bagasse and African palm rachis of 50 g/L.

Keywords: lignocellulosic material, fermenter, biofuels, sugarcane bagasse, african palm rachis, Products, byproducts

Introducción

La población mundial crece de manera exponencial y con ella los cambios sociales, cambios ambientales, las diferentes actividades económicas y los comportamientos de consumo, lo cual ha ocasionado una progresiva disminución de las reservas de combustibles fósiles y un aumento en la cantidad de residuos sólidos que se generan año tras año.

La energía se ha convertido en un tema fundamental a nivel mundial, debido al carácter limitado de las fuentes fósiles tales como el petróleo, carbón y el gas natural y los perentorios efectos del cambio climático, asimismo, generan riesgos que potencialmente pueden reducir el bienestar humano de la generación presente y las generaciones futuras. (Forero, 2015)

Es por esta razón que en los últimos años se ha generado un gran interés hacia el desarrollo de fuentes de energías sustentables y nuevas tecnologías más limpias que disminuyan el calentamiento global, y que, a su vez puedan suplir las necesidades del consumo de energía, asegurando la preservación y conservación de los recursos naturales (Gómez et al., 2022), donde la participación y cooperación de los países sea activa, consiente y en pro del desarrollo sostenible.

En este contexto, los biocombustibles (etanol, n-butanol, biodiesel, entre otros) producidos a partir de desechos orgánicos se han constituido en una posible respuesta, siendo una alternativa prometedora en cuanto a fuentes de energía renovables, ayudando a reducir tanto la dependencia mundial de la producción de petróleo como las emisiones de CO₂. (Macias et al., 2022)

Con respecto al constante aumento de la demanda de energía, se prevé que los recursos de combustibles fósiles a nivel mundial se agoten en las próximas décadas, poniendo en peligro la seguridad energética mundial. Es por esta razón que la transición hacia combustibles de baja intensidad en carbono se hace necesaria para hacer frente al cambio climático (Broda et al., 2022),

permitiendo a los países diversificar su canasta energética con efectos positivos sobre el medio ambiente y sobre el desarrollo rural de los países al basarse en insumos agrícolas.

Colombia ha implementado una serie de leyes y reformas desde 2001, con la finalidad de impulsar el uso y la fabricación de biocombustibles y eliminar impuestos al valor agregado. Adicionalmente, presenta grandes ventajas en cuanto a las condiciones geográficas para la producción de materia prima, aunado al incremento de la demanda local de biocarburante (García y Calderón, 2012). Además, es un país con alto potencial en la generación de productos de valor agregado a partir de biomasa, debido a la cantidad de residuos que se generan como consecuencia de una variada actividad agrícola (Barragán et al., 2013). En este sentido, los biocombustibles obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica son una gran alternativa, debido a que estas materias primas no compiten con los cultivos alimentarios y presentan bajos costos.

1 Planteamiento del problema

El 92,8% de la energía final en Colombia es consumida por tres sectores: transporte, industrial y residencial. Siendo el sector transporte el que representa una mayor demanda de energía, con un 42,8%. Adicionalmente es el sector que representa mayores ineficiencias por uso, debido a que solamente el 24,3% de la energía consumida en el sector se convierte en energía útil, lo que implica ineficiencias de aproximadamente el 69,9 %, generando impactos negativos sobre la calidad del aire y la salud de la población (Conpes 4075 Política de Transición Energética, 2022).

En Colombia la oferta de energía primaria está compuesta principalmente por combustibles fósiles (carbón y petróleo), con una participación cercana al 77% del total, mientras que la

hidroelectricidad, el gas natural y las fuentes no convencionales de energía renovable (bagazo, biocombustibles y leña) suman el restante 23% (Ministerio de Energía, 2019).

Según la “Energy Information Agency” (IEA), si la tendencia de consumo continúa, se estima que para el año 2030 el mundo necesitará al menos el 60% más de la energía que se emplea actualmente, del mismo modo, que las reservas de petróleo se agoten en menos de 45 años. Este consumo desmedido puede conllevar a una crisis energética mundial, además de problemáticas ambientales, sociales y económicos (Lam et al, 2011).

Por otra parte, los impactos ambientales negativos debido a la generación y desaprovechamiento de residuos dentro del proceso de obtención de azúcar como es el caso del bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana generado como residuo en la industria de aceites. Santander es uno de los mayores generadores de este tipo de material lignocelulósico, debido a la cantidad de hectáreas sembradas de estas especies (Fedepalma, 2023), los cuales se han convertido en materias primas importantes para el estudio de productos de mayor valor agregado y con mayor interés científico debido a su composición química y propiedades.

En Colombia el proceso de vinculación del sector productivo con la investigación ha sido muy lento, esto se debe a la escases de inversiones (Navarro, 2022) y sin un debido control, regulación y monitorización, generando debilidades en la implementación de nuevas tecnologías (Acosta, 2014). Adicionalmente, algunos mercados convencionales no han contemplado el componente de desarrollo e innovación tecnológica porque requiere de grandes inversiones (Navarro, 2022). No obstante, existe una amplia variedad de herramientas informáticas para la simulación de procesos en el marco de la biotecnología, que no requieren de presupuestos altos.

En este sentido, la finalidad del presente trabajo es identificar los productos de mayor interés para el desarrollo incipiente de las biorrefinerías, así como la utilización de biomasa

lignocelulósica y el diseño de un fermentador para la formación de productos de segunda generación, identificando los mejores procesos tecnológicos que sean aplicables, mediante la simulación de los procesos involucrados en SuperPro Designer.

2 Justificación

Colombia se encuentra entre los 10 mayores productores de caña de azúcar en el mundo, “entre los años 2015 y 2016 alcanzó a producir aproximadamente 36’830.506 toneladas de caña de azúcar, quedando por encima de países como Guatemala, Australia y Estados Unidos” (del Río, 2018). Con respecto al sector palmero, el país es el cuarto productor del mundo y el primero de Latinoamérica, cuenta con 590.189 hectáreas sembradas con palma, de las cuales 478.045 ya son productivas, según Fedepalma (Gaviria, 2022).

La mayor producción de caña panelera en Colombia se concentra en los departamentos de Cundinamarca, Antioquia, Santander y Boyacá. Santander cuenta con aproximadamente 39.937 hectáreas sembradas de caña panelera, con un rendimiento de 8,52 toneladas por hectárea, por lo tanto, es el mayor productor de panela en Colombia. A su vez, el cultivo de caña es una actividad agrícola de gran importancia socioeconómica para este departamento (ICA, 2018).

Con respecto a la palma africana, Santander cuenta con una de las zonas más significativas en palma aceitera del país, en lo concerniente a área y producción. Según Fedepalma, este departamento cuenta con cerca de 1.132 productores, alrededor de 92 mil hectáreas sembradas y 80 mil hectáreas en producción, para una productividad de 2,8 toneladas de aceite de palma crudo por hectárea en 2020. Este sector agropecuario genera en Santander cerca de 30.000 empleos (Fedepalma, 2023)

La gestión agro-industrial abarca la producción de productos a partir del procesamiento industrial de materias primas agrícolas. Estas tendencias de bioproducción pueden fortalecer las cadenas de valor en la producción agrícola de un país, al estar relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa en un contexto empresarial de desarrollo sostenible. Al mismo tiempo, con el adecuado proceso se adquieren varios beneficios tanto ambientales como económicos y sociales. Se promueve la transición energética, el cual es un factor importante dado que es un eje fundamental en el crecimiento económico sostenible, el incremento de la seguridad y confiabilidad energética, y en la disminución de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) que contribuyen a reducir los impactos en el cambio climático y la salud de la población (Conpes 4075 Política de Transición Energética, 2022).

Por otra parte, la biotecnología permite maximizar, optimizar y valorizar los residuos sólidos agroindustriales, convirtiéndose en uno de los elementos fundamentales para generar desarrollo y competitividad (Pérez, 2021). Por esta razón, se propone el diseño de un fermentador para la obtención de productos empleando un simulador, lo cual facilita el estudio de la sensibilidad del sistema frente a cambios en las condiciones de operación, determinando la configuración más adecuada desde un enfoque productivo y económico (Alcívar et al., 2022).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un fermentador basado en parámetros fundamentales para la producción de productos valiosos, utilizando glucosa obtenida de la hidrólisis de bagazo de caña de azúcar o raquis de palma africana como materia prima.

3.2 Objetivos específicos

Identificar el o los productos con los mejores rendimientos teóricos mediante una vigilancia tecnológica en los procesos de fermentación de glucosa derivada del bagazo de caña de azúcar o del raquis de palma africana.

Diseñar el fermentador basado en los parámetros obtenidos en la vigilancia tecnológica de los procesos de sacarificación.

Evaluar teóricamente el balance de masa del proceso de fermentación del reactor diseñado, utilizando simulación con el software SuperPro Designer.

4 Marco referencial

4.1 Marco teórico

La gestión de nuevas estrategias y alternativas de protección ambiental, implican un conocimiento amplio de la realidad ambiental local y regional, además de los componentes que hacen parte del medio, en ese sentido se hace necesario abordar la *Educación Ambiental*; la cual es el proceso que consiste en reconocer valores y aclarar conceptos con objeto de fomentar y formar actitudes y aptitudes necesarias para comprender y apreciar las interrelaciones entre el hombre, su cultura y su medio biofísico (MinEducación, 2005). La finalidad de la gestión ambiental es la formación ética y responsable para la protección del medio ambiente, desarrollando estrategias para prevenir y mitigar problemas ambientales, logrando un ambiente sostenible.

Dentro de las alternativas más limpias se estudia el uso de la *biomasa*, considerada en el contexto energético como una fuente de energía renovable que abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas como el caso de la *biomasa lignocelulósica*, la cual es una

importante fuente con potencial en la producción de biocombustibles, cogeneración de energía eléctrica y generación de compuestos químicos, entre otras aplicaciones. En la tabla 1 se presentan las fracciones promedio de los compuestos más representativos por su disponibilidad en biomasa lignocelulósicas: celulosa, hemicelulosa y lignina, para diferentes tipos de biomasa (Ruíz et al., 2014).

Tabla 1. *Fracción promedio de biomasa lignocelulósica*

Materia prima	Fracción de celulosa	Fracción de hemicelulosa	Fracción de lignina
Cultivos energéticos	0,366	0,161	0,219
Residuos de cosecha	0,380	0,320	0,170
Biomasa leñosa	0,437	0,283	0,243

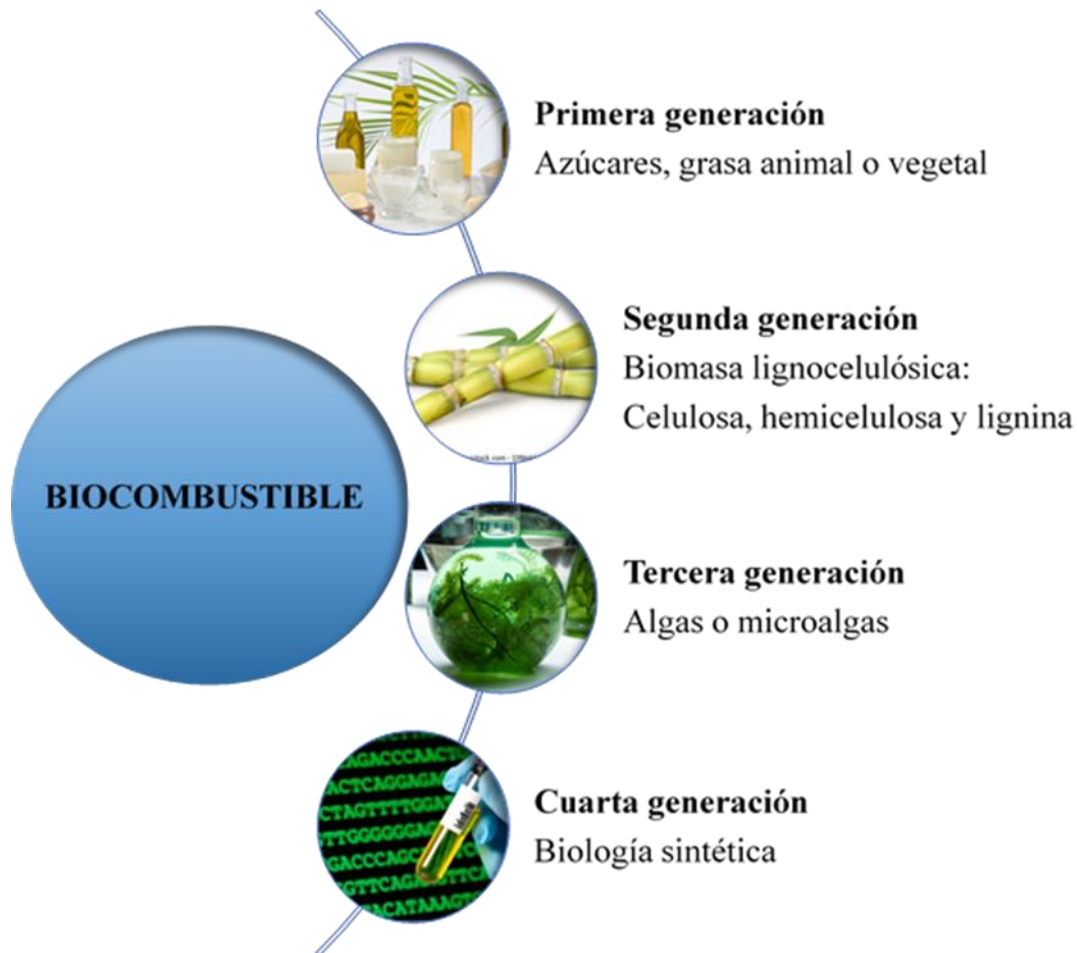
Adaptado de (Ruíz et al., 2014).

Dentro de los materiales lignocelulósicos se encuentra el *bagazo de caña de azúcar*, el cual es un residuo de la industria azucarera y desde el punto de vista químico, generalmente presenta la siguiente composición: 46,6% de celulosa, 25,2% de hemicelulosas y 20,7% de lignina en base húmeda (Jirón et al., 2022). Por otra parte, el *raquis de palma africana* con características similares al bagazo de caña de azúcar, en cuanto a composición, es uno de los subproductos generados durante el proceso de producción del aceite. Este residuo está conformado por una porción de entre 17,7% y 26,1% de racimo fresco, otra entre el 62% y 72% correspondiente al fruto y el 10% restante, representa la humedad del racimo (Mejía, 2012).

A partir de las biomásas mencionadas anteriormente y a través de diferentes pretratamientos y tratamientos como la *hidrólisis enzimática*, la cual ha recibido especial atención en virtud de su potencial para convertir la fracción celulósica de sustratos lignocelulósicos en azúcares reductores, es factible la producción de diferentes productos y subproductos en el campo de las *biorrefinerías*, definida como plataformas tecnológicas donde se generan diversos productos

de interés a partir de la biomasa, con base en procesos alternativos a los de las refinerías de petróleo tradicionales. La demanda energética ha impulsado que las biorrefinerías hayan diversificado sus procesos de producción, generando una amplia gama de productos clasificados en cuatro categorías: biocombustibles (bioetanol, biodiesel, biobutanol); electricidad (por combustión de biogás, biohidrógeno o biomasa); bioproductos (solventes, cosméticos, pigmentos, etc.) y biomateriales (bioplásticos y biocarbón) (Tinoco et al., 2021)

Los *biocombustibles* se clasifican en primera, segunda, tercera y cuarta generación en función de la materia prima empleada y el proceso de producción, como se presenta en la figura 1. Los biocombustibles de primera generación se producen a partir de fermentación, esterificación y digestión como por ejemplo el biodiesel y el biogás, tienen grandes ventajas en cuanto a sus bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, su principal desventaja es la afectación directa a la seguridad alimentaria. En cuanto a los de segunda generación, donde se aprovecha la biomasa que no se emplea para producir alimentos, principalmente la celulosa como es el caso del bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana, presentan como principal ventaja que no existe desviación de los cultivos usados con fines alimenticios. (Garrido, 2020)

Figura 1. Clasificación de los biocombustibles

Adaptado de (Garrido, 2020).

El presente estudio se centra en los productos de segunda generación procedentes del bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana, debido a que poseen altos contenidos orgánicos, asimismo, alto rendimiento, facilidad de recolección y almacenamiento. Esta biomasa ha sido convertida con éxito en diferentes productos líquidos y gaseosos, donde se incluyen el biohidrógeno, biometano, biometanol, bioetanol y biobutanol, ácido láctico, entre otros (Pan et al., 2022).

El *biogás o biometano* es el producto primordial de la digestión anaerobia de la biomasa, compuesto principalmente por una mezcla gaseosa de biometano y dióxido de carbono. Así pues,

es una fuente de energía alternativa atractiva debido a que presenta una disponibilidad energética descentralizada (Nuntón, 2018) y un poder calorífico de aproximadamente 48 MJ/Kg (Alvarado, 2021). Por otra parte dentro de los biocombustibles se encuentra el *biohidrógeno*, el cual presenta varios beneficios, se puede producir por medio de una ruta bioquímica que incluye pre-tratamiento, hidrólisis y fermentación (Nikolaidis y Poullikkas, 2017), dentro del proceso la biomasa se descompone térmicamente en condiciones deficientes de oxígenos, con el fin de producir una mezcla de H₂ y CO, comúnmente denominado 'syngas', posteriormente, la mezcla es sintetizada para obtener combustibles líquidos como hidrógeno y metanol (Pan et al., 2022). Su poder calorífico es de 120 MJ/Kg (Alvarado, 2021).

El *biometanol* es otro de los buenos biocombustibles que se puede obtener, es fácil de almacenar y transportar, es líquido a temperatura ambiente y tiene una alta densidad de energía volumétrica, presenta un índice alto de octanaje en comparación con la gasolina pura y un poder calorífico de 19,9 MJ/Kg (Alvarado, 2021), asimismo, se puede emplear como materia prima para la síntesis de una variedad de compuestos orgánicos de gran importancia en la industria (Gautam et al., 2020). En esa misma línea se encuentra el *bioetanol*, el cual presenta un poder calorífico de 26,7 MJ/kg (García et al., 2016) y se utiliza actualmente como la mezcla más favorable de sustituto de la gasolina y es un producto de la fermentación de azúcares, La producción de bioetanol comienza con materiales orgánicos y es un bioproceso misceláneo de cinco etapas: Preparación de la materia prima, hidrólisis, fermentación, separación y deshidratación, adicionalmente, el tratamiento de efluentes (Llenque et al., 2020).

El *biobutanol*, se produce a través de un proceso conocido como fermentación de acetona-butanol-etanol (ABE), en una proporción aproximada de 3:6:1 (Pan et al., 2022). Es considerado como un biocombustible con propiedades más versátiles comparado con el bioetanol, es más

energético, más seguro y más fácil de manejar, su poder calorífico es 36,04 MJ/kg (Dzięgielewski et al., 2014), siendo este valor más alto, comparado con el bioetanol.

El *ácido láctico* (ácido 2-hidroxiopropanoico o ácido hidroxipropionico) tiene dos formas ópticamente activas [dextro (D) y levo (L)] y la forma racémica, ópticamente inactiva, que es la comercial. El ácido láctico presenta un amplio rango de aplicaciones en las industrias alimentarias, farmacéuticas, químicas y cosméticas. Por lo que su producción biotecnológica puede ser un proceso rentable si se utilizan materiales de bajo costo y las condiciones de fermentación óptimas (Rodríguez et al., 2016).

Por último, el *ácido acético*, el cual tiene una gran importancia comercial y es un aditivo clave para productos de valor agregado en la industria textil, la industria alimentaria, pinturas y adhesivos; la demanda de ácido acético está aumentando a nivel mundial (Casallas y Giraldo, 2020)

Los productos mencionados anteriormente se obtienen por medio de *fermentación*, que consiste en un proceso metabólico de oxidación incompleta que puede ser anaeróbico o aeróbico, donde se obtiene como producto final un compuesto orgánico. Existen diversos tipos de fermentaciones, entre ellos, la *fermentación alcohólica*, donde las levaduras son las encargadas de convertir la glucosa a alcoholes más eficientes (Lima, 2019).

La producción de productos a partir de biomasa se considera una energía renovable y amigable con el ambiente, entrando dentro de la clasificación de las *fuentes de energías alternativas*, debido a que, por definición, estas son todas aquellas energías limpias provenientes de fuentes naturales e inagotables que al producirse no contamina y además son renovables (factorenergía, 2016).

4.2 Estado del arte

Para el diseño del estado del arte, se hace una síntesis de investigaciones previas teniendo en cuenta casos de estudio en donde se plantea la obtención de diferentes productos por medio de la fermentación de materiales lignocelulósicos.

En un estudio realizado en Polonia se investigó la efectividad de hidrolizar tres materiales de biomasa lignocelulósica residual (paja de cebada, virutas de roble, granos usados) con el fin de realizar proceso de fermentación y obtener etanol después de un pretratamiento biológico con *Trichoderma viride fungi*. Estudiaron la correlación entre la temperatura y la actividad, obteniendo como resultado que independientemente de la temperatura del proceso, la actividad enzimática promedio de los hongos (índice de actividad) osciló entre 1,25 y 1,31. 94 mL de destilado, con un 65% (v/v) concentración de etanol producido por la hidrólisis y fermentación de los azúcares liberados de la paja de cebada. Finalmente concluyeron que la eficiencia del método de pretratamiento y el tipo de materia prima utilizada determinan la cantidad de etanol producido a partir de sustratos lignocelulósicos (Hawrot-paw y Stanczuk, 2023)

La Universidad de León en España mediante la tesis doctoral “Degradación de material lignocelulósico. Evaluación de pretratamientos químicos e hidrólisis enzimáticas para la obtención de alcoholes por fermentación”. Concluye que para aumentar la rentabilidad de la producción de butanol mediante fermentación ABE, es crucial la elección de la biomasa lignocelulósica, así como, la selección del tipo y las condiciones del pretratamiento, debido a que condiciona tanto la concentración de azúcares fermentables obtenida en el hidrolizado, como la cantidad y tipo de los compuestos inhibidores presentes. Asimismo, es fundamental la selección de una cepa productora de butanol adecuada para cada hidrolizado (Paniagua, 2020)

En el panorama Nacional, se presenta una propuesta para la obtención de biohidrógeno por fermentación oscura a partir de un residuo agroindustrial, realizada en el año 2022 en Bogotá. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una revisión bibliográfica de los residuos de las agroindustrias más representativas en Colombia, asimismo de los microorganismos que producen hidrógeno y el dimensionamiento de los equipos. Como conclusión encontraron que el cogollo de azúcar es el residuo óptimo y con respecto al microorganismo, determinaron que la bacteria *Enterobacter cloacae* es una opción adecuada, teniendo en cuenta como criterios de decisión la temperatura óptima de crecimiento, el tipo de respiración celular, el tipo de fermentación y el rendimiento reportado de producción de hidrógeno. Adicionalmente, se detallaron las condiciones de operación bajo las cuales debe operar el biorreactor para garantizar el crecimiento del microorganismo con altos valores de obtención de hidrógeno. (Cadena y Cordoba, 2022)

Otra investigación realizada en la ciudad de Bogotá, denominada “Proceso de producción de bioetanol, a partir de la biomasa hidrolizada de la *Eichhornia crassipes* con la levadura (*saccharomyces cerevisiae*)” obtuvo que la planta *Eichhornia Crassipes* se presenta como un material óptimo para la obtención de bioetanol gracias a su contenido de hemicelulosa. La producción de bioetanol se llevó a cabo mediante los procesos químicos de hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida previa a la fermentación con inóculo fermentador *Saccharomyces cerevisiae* más conocido como levadura de cerveza. Adicionalmente, se genera un consumo de glucosa en un tiempo de 6,96 horas, lo cual es viable con las cantidades utilizadas de sustrato e inóculo fermentador. (Jiménez, 2018)

A nivel local se presenta un caso de estudio con el objetivo de aprovechar los residuos orgánicos generados por la cáscara de piña en las plazas de mercado San Francisco con 17.7 toneladas a la semana y Central de Abastos con 89.3 toneladas a la semana. Mediante el simulador

de procesos Aspen Plus se llevó a cabo el proceso para la producción de bioetanol y el subproducto llamado bromelina que es bastante apetecido en diferentes industrias como la farmacéutica, alimentaria, cosmética, textil, entre otros. Concluyendo que con un flujo de materia prima de entrada de 100 kg/h obtienen 23.39 litros/h de bioetanol y teniendo en cuenta un flujo de materia prima de entrada igual al de la producción de bioetanol de 100 kg/h obtienen 3.46 kg/h de bromelina. Por esta razón es un proyecto bastante viable y su periodo de recuperación es de 5,02 años. (Jaramillo, 2022)

El resultado de las investigaciones anteriormente mencionadas deja en evidencia que el uso de materiales lignocelulósicos para la obtención de diferentes biocombustibles de segunda generación, es una opción sostenible, renovable, respetuosa con el medio ambiente y económicamente viable.

4.3 Marco legal

Colombia en su reglamentación ambiental, cuenta con diversas normas, decretos, leyes y proyectos concertados, que buscan optimizar los procesos productivos, fomentar el crecimiento económico, reducir la contaminación y mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Es por esta razón que, en aras de proteger los recursos naturales, Colombia da inicio a su normativa en pro del ambiente en la década de los setenta con el Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974, 1974), con este decreto el gobierno busca el mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables con el objetivo de evitar el deterioro ambiental. En el año 1991 surge la constitución política en donde se listan los derechos y deberes ambientales de la ciudadanía y el Estado, de los 380 artículos, 35 están dedicados a las cuestiones ambientales,

haciendo referencia a la protección del medio ambiente como principio fundamental, consagrándolo como un derecho colectivo, dirigido a garantizar una mejor calidad de vida (Constitución Política de Colombia, 1991). Dos años más tarde se crea el ministerio del medio ambiente, las corporaciones autónomas regionales y todo el sistema ambiental nacional SINA con la Ley 99 de 1993 (Ley General Ambiental de Colombia. Ley 99 de 1993, 1993). Esta ley hace referencia a la regulación de las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente entre otras disposiciones. Seguidamente y con la aprobación de la ley 693 de 2001, por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo (Ley 693 de 2001, 2001), Colombia entra a la era mundial de los combustibles de origen vegetal. El propósito principal de la ley es diversificar la canasta energética colombiana, mediante el uso de alternativas compatibles con el desarrollo sostenible. Posteriormente, se expide la Ley 939 de 2004, por la cual se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal, esta ley permite ampliar el espectro en el uso de los biocombustibles (Ley 939 de 2004, 2004).

Con el crecimiento de la población y la necesidad de introducir vigorosamente las diferentes alternativas para la protección del medio ambiente, se crea la normatividad relacionada con las mezclas de biocombustibles y combustibles fósiles, a partir de diferentes resoluciones que año a año van mejorando las mezclas, ofreciendo más protagonismo a los biocombustibles y permitiendo que los cambios se cumplan a nivel nacional como el caso de la resolución 40184 de 2018, donde se resuelve que deben distribuirse mezclas de un diez por ciento (10%) de biocombustible para uso en motores diésel con un noventa por ciento (90%) de diésel fósil, denominadas B-10, en Bogotá D.C, centro del país y llanos orientales (MME -ministerio de Minas y Energía, 2018). Asimismo, se estipulan normativas enfocadas en la calidad y precios de los

biocombustibles y sus mezclas, del mismo modo, beneficios a proyectos de alto impacto positivo tanto económico como ambiental de los biocombustibles.

Colombia cuenta con una normativa robusta con respecto al uso y consumo de energías renovables, del mismo modo, se encuentran estipulados los incentivos económicos y requerimientos técnicos en materia de energías limpias, no obstante, muestra baja implementación de la normativa, del mismo modo, no cuenta con suficientes lineamientos y estrategias para promover el desarrollo de productos como el biohidrógeno, presenta insuficiencia en la normativa asociada a las actividades mineras, todo esto aunado a brechas persistentes en el fortalecimiento y planeación de los mercados energéticos (Conpes 4075 Política de Transición Energética, 2022).

5 Metodología y resultados

Figura 2. *Diseño metodológico*



5.1 Revisión bibliográfica de los productos más representativos

Las biorrefinerías dependen en gran medida del material a tratar y se clasifican en bioquímicas las cuales se basan en la producción de azúcares y termoquímicas basadas en la

generación de gas de síntesis, biogases o productos ricos en enlaces de carbono. A nivel mundial, algunos compuestos de la refinería tradicional se están reemplazando por compuestos provenientes de la biorrefinería como el etanol, el etileno, el ácido láctico, 1,3-propanediol, ácido succínico, ácido itacónico, aceites microbianos, el ácido acrílico, 1,4-butanediol, ácido 2,4- diaminobutírico, n-butanol, ácido fumárico, ácido 2,5-furandicarboxílico y el ácido adípico, entre otros (Piñeros, 2014).

El objeto de estudio del presente proyecto se centrará en los biocombustibles más representativos obtenidos a partir de la etapa posterior de la hidrólisis de materiales lignocelulósicos como el bagazo de la caña de azúcar y el raquis de palma africana, teniendo en cuenta su papel clave para abordar los desafíos ambientales, mejorar la sostenibilidad y promover una transición hacia fuentes de energía más renovables y sostenibles.

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica de los cuatro biocombustibles más representativos: biohidrógeno, biometano, bioetanol y biobutanol.

5.1.1 Producción de biohidrógeno

El biohidrógeno tiene varias rutas de producción en función de los microorganismos usados y las variables relacionadas con su metabolismo (fuente de energía, pH, temperatura, sustrato, presencia o ausencia de oxígeno, luz). La tabla 2 resume las principales rutas de biosíntesis en función de su fuente de energía.

Tabla 2. *Resumen características de los métodos de producción de biohidrógeno*

Método	Presencia de luz	Uso de materia orgánica	Presencia de oxígeno	Microorganismos
Biofotólisis directa	sí	no	no	cianobacterias, algas

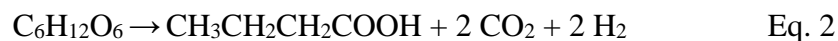
Método	Presencia de luz	Uso de materia orgánica	Presencia de oxígeno	Microorganismos
Biofotólisis indirecta	sí	no (generada en el metabolismo)	no	cianobacterias, algas
Fotofermentación	sí	sí (ácidos grasos)	no	bacterias púrpuras
Fermentación oscura	no	sí (biomasa, azúcares)	no (tolerable)	consorcios microbianos

Tomado de (Doménech, 2020)

Acorde con la información que se presenta en la tabla 2, y la naturaleza de la materia prima (glucosa) objeto de estudio en el presente proyecto, se determina que el método más viable para la obtención de Biohidrógeno es la fermentación oscura considerando que presenta ventajas operacionales como realizarse en ausencia de luz, lo que implica menores costos en equipos, ser tolerante al oxígeno y realizarse usando consorcios microbianos brindándole flexibilidad en las condiciones operativas del proceso. No obstante, presenta limitaciones considerables como la inestabilidad de los consorcios microbianos, lo que implica resultados inconsistentes, condiciones variables de operación, formación de subproductos que pueden inhibir la producción de hidrógeno y por tanto una gran dificultad para tener una producción estable y eficiente de este compuesto (Chandekar et al., 2024).

El biohidrógeno es un producto de la fermentación de materia orgánica según la ruta específica, los consorcios de microorganismos transforman los azúcares, glucosa preferentemente, en diferentes ácidos grasos, produciendo o en algunos casos consumiendo hidrógeno. Algunas

reacciones destacables son las de producción de ácido acético (Eq. 1), ácido butírico (Eq. 2) y ácido propiónico (Eq. 3).



Considerando que los consorcios microbianos no solo producen hidrógeno, sino que también consumen este producto, los rendimientos prácticos de hidrógeno en la fermentación oscura están alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa (Bedoya et al., 2008).

Las fermentaciones oscuras se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas (25-40°C), hasta termófilas (>50°C), aunque se observa un mayor rendimiento de producción de hidrógeno en condiciones termófilas, más exactamente alrededor de los 70°C (Doménech, 2020).

La producción de hidrógeno depende de las condiciones del proceso, siendo los factores más determinantes: temperatura, pH, Tiempo De Retención Hidráulica (HRT) y presión parcial del gas. Las especies bacterianas que intervienen en la biosíntesis de hidrógeno por fermentación oscura corresponden a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium* (Bedoya et al., 2008)

Uno de los mejores rendimientos obtenidos fue el realizado por ÖZGÜR, el cual, usando un proceso secuencial, iniciando por una fermentación oscura y luego realizando Fotofermentación logró obtener 6,85 mol de biohidrógeno por mol de hexosa consumida (Doménech, 2020). Lo que equivale a un rendimiento de 1.11% en masa.

5.1.2 Producción de biometano

La biosíntesis de metano es un proceso ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales ofreciendo ventajas importantes como la baja complejidad estructural de sus reactores.

La síntesis del biometano implica un proceso bioquímico con múltiples etapas y microorganismos de diferentes tipos que llevan a cabo reacciones de manera simultánea y consecutiva hasta reducir la materia prima en metano y dióxido de carbono (Duda et al., 2015). Los procesos bioquímicos podrían resumirse en 4 etapas:

- Hidrólisis
- Etapa fermentativa o etapa acidogénica
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

En la primera fase, las moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán usados como materia prima por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos realizan la síntesis de metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2 (Minenergía, 2011).

Los principales factores que determinan la conversión de biomasa en metano son la temperatura, pH, nutrientes, naturaleza de la materia prima, niveles de sólidos totales y sólidos disueltos. En cuanto a temperatura, la mayor parte de los procesos opera en régimen mesofílico, buscando tener muy bajas variaciones de temperatura, aunque en la actualidad se trabaja cada vez más el rango termofílico, esto con el fin de eliminar organismos ajenos al proceso, organismos patógenos, principalmente buscando una mayor velocidad de proceso (que en operación mesófila

suele estar alrededor de los 30 días), sin embargo, esto genera más inestabilidad en las condiciones de operación (Ward et al., 2008).

En la producción de biometano existen muchos géneros y especies involucrados en el proceso, como, por ejemplo, los géneros *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* que están presentes en todas las fases del proceso, aunque teniendo un protagonismo dominante en la fase acidogénica. Por otro lado, los principales microorganismos que intervienen en la producción de metano están representadas por las especies *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*.

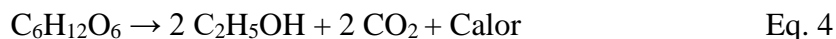
La ausencia de oxígeno es crucial en este proceso por diversos motivos, uno de los más importantes es impedir el desarrollo de especies metanotróficas, las cuales degradan el metano que se va produciendo dentro del proceso.

Se estima que a partir de 110 kilogramos de estiércol se pueden generar 5,7m³ de biogás, con una concentración de metano que puede oscilar entre el 55% y el 70% (Minenergía, 2011).

5.1.3 Producción de bioetanol

La producción de bioetanol se realiza a partir de materias primas ricas en carbohidratos, su biosíntesis se puede realizar a partir de frutas, vegetales, cereales, tubérculos y materias primas lignocelulósicas.

La ecuación que representa la biorreacción se resume a continuación:



La eficiencia teórica estequiométrica para convertir glucosa en etanol es de 0.511 g de etanol y 0.489 g de CO₂ por cada 1 g de glucosa metabolizada (Ventrua, 2020). Del mismo modo,

utilizando residuos sólidos urbanos, Alejandro Martínez et al, lograron obtener 0.50 g de etanol por cada g de glucosa, con una producción marginal de CO₂ y CH₄ (Martínez et al., 2014).

En la industria, el rendimiento del etanol se calcula en relación con el total de azúcar en el sistema de fermentación, sin deducir el azúcar residual. Este rendimiento puede ser tan alto como su valor teórico, que oscila entre el 90% y el 93%. (Ventrua, 2020).

Los microorganismos encargados de llevar a cabo este proceso de fermentación son las levaduras, siendo la *Saccharomyces cerevisiae* la representativa y la más usada a la fecha, esto se debe a que puede producir bioetanol a una concentración de hasta 18% en el caldo de fermentación (*Capítulo 2. Producción de Etanol y Sus Coproductos. Procesos de Molienda En Seco y Húmeda*, 2019), no obstante, se han llevado a cabo estudios con otras cepas como la *Kluyveromyces fragilis*, *Torulaspota* y *Zymomonas mobilis* pero su explotación industrial es muy pequeña.

El crecimiento de las levaduras en condiciones libres óptimas es un factor fundamental para obtener altos rendimientos, siendo la temperatura un factor crítico para la reproducción de las levaduras y el rango más óptimo entre 28°C y 32°C y un pH alrededor de 5.5. La fermentación a temperaturas superiores a los 35°C no tiene un buen porcentaje de conversión en alcoholes siendo necesario un sistema de enfriamiento (*Capítulo 2. Producción de Etanol y Sus Coproductos. Procesos de Molienda En Seco y Húmeda*, 2019).

La contaminación con otros microorganismos es uno de los inconvenientes más relevantes, toda vez que microorganismos como los lactobacilos y levaduras silvestres como *Dekkera/Brettanomyces* cuando se infiltran al proceso compiten por los nutrientes disponibles en el caldo (glucosa, aminonitrógeno, vitaminas, minerales), sintetizando compuestos inhibitorios para la *Saccharomyces cerevisiae* como el ácido acético. Por este motivo, una buena organización, desinfección de utensilios y el uso de antibióticos en las plantas de producción de bioetanol se

convierten en un factor crucial para la obtención de mayores rendimientos de operación (Baeyens et al., 2015).

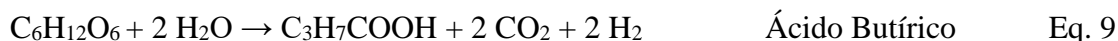
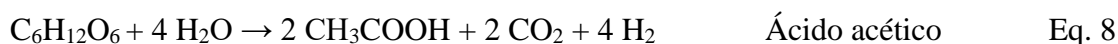
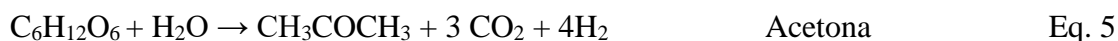
5.1.4 Producción de biobutanol o butanol

El biobutanol se sintetiza naturalmente a partir de una fermentación referida como ABE, puesto que sus principales productos son la Acetona, el Butanol y el Etanol.

Existe una gran cantidad de microorganismos que biológicamente producen butanol como las bacterias *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium butyricum* o la arquea *Hyperthermus butylicus*, sin embargo, debido a la capacidad de procesar una gran cantidad de fuentes de carbono el género más estudiado es el *Clostridium*. En el caso de *Clostridium acetobutylicum* tiene una proporción de síntesis ABE de 3:6:1, sin embargo, existen variedades que han sido alteradas genéticamente y han logrado aumentar el metabolito principal, aunque la cepa que produce disolventes en mayor proporción que la *Clostridium acetobutylicum*, es la *Clostridium beijerinckii* (anteriormente conocida como *Clostridium butylicum*), que llega a tener producciones de 3:16:1 ABE y algunas de sus cepas pueden producir Isopropanol en lugar de acetona. La especie *Clostridium beijerinckii* BA101 ha llegado a producir 23,5 a 33 g/L de disolventes, siendo más tolerable a las altas concentraciones de butanol en el medio de fermentación, lo cual es un factor crítico en el proceso (García, 2017). Por otro lado, la cepa *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 no solo tiene una gran tolerancia al butanol, sino también una excelente conversión de glucosa en solventes y no produce etanol, presentando altos niveles productivos.

Por lo general, la temperatura óptima de fermentación oscila entre los 30-40°C, dándose en condiciones completamente anaeróbicas, iniciando por la fase acidogénica y a continuación, la

fase solventogénica. En la fase inicial, existe un rápido crecimiento de bacterias que sintetizan en este proceso ácido acético, ácido butírico, dióxido de carbono (CO₂) e Hidrógeno. En la fase solventogénica, los ácidos orgánicos que fueron sintetizados en la fase inicial se asimilan por los microorganismos, siendo la acetona, el butanol y el etanol los principales compuestos producto de esta etapa (Infante, 2016). Las ecuaciones estequiométricas asociadas a este proceso se relacionan a continuación:



En la tabla 3 se presenta un resumen de las producciones de fermentaciones ABE mediante *Clostridium beijerinckii* a partir de diferentes materias primas:

Tabla 3. Producción de fermentaciones ABE mediante *Clostridium beijerinckii*

Producto de fermentación	Sustratos de fermentación					
	Glucosa	Almidón de maíz	Melazas de soja	Residuos agrícolas	Cacahuates	Paja de trigo
Acetona (g/l)	4,3	7,7	4,2	4,8	5,7	2,2
Butanol (g/l)	19,6	15,8	18,3	9,8	15,7	8,8
Etanol (g/l)	0,3	1,2	0,3	0,2	0,3	0,8
ABE total (g/l)	24,2	24,7	22,8	14,8	21,7	11,8

Tomado de (Infante, 2016).

5.2 Vigilancia tecnológica

Con el objetivo de desarrollar este ejercicio se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda

(TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic

Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (biofuels) AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis")), realizando variaciones en la ecuación al incluir los diferentes productos que se pueden obtener en el área de los biocombustibles, los cuales, serán materia de estudio.

De acuerdo con la ecuación de búsqueda estructurada se recuperaron 546 documentos y en la tabla 4 se presentan las variaciones realizadas en la ecuación de búsqueda para cada uno de los productos junto con la cantidad de documentos recuperados:

Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda con sus respectivos documentos recuperados de la base de datos Scopus

Ecuación de búsqueda	Documentos recuperados
(TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (butanol OR n-butanol OR {ABE} OR biobutanol OR bio-butanol OR "bio butanol") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis"))	88
(TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (ethanol OR bioethanol OR bio-ethanol OR "bio ethanol") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis"))	1273
(TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (hydrogen OR biohydrogen OR bio-hydrogen OR "bio hydrogen") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis"))	244
(TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-	114

Ecuación de búsqueda	Documentos recuperados
KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (biogas OR bio-gas OR "bio gas" OR methane OR biomethane OR bio-methane OR "bio methane") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis"))	

Se realizó una vigilancia tecnológica seleccionando la ecuación de búsqueda que incluye al biobutanol como producto obtenido a partir de la fermentación de la glucosa proveniente del bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana, considerando los capítulos de libros, revisiones y artículos científicos indexados en la base de datos referencial de Scopus.

Los resultados obtenidos de la base de datos de Scopus de la ecuación de búsqueda (TITLE-ABS-KEY ("lignocellulosic biomass" OR "Lignocellulosic Material" OR bagasse OR rachis) AND TITLE-ABS-KEY (ferment*) AND TITLE-ABS-KEY (butanol OR n-butanol OR {ABE} OR biobutanol OR bio-butanol OR "bio butanol") AND TITLE-ABS-KEY ("sugar cane" OR sugarcane OR saccharum OR "oil palm" OR "Elaeis guineensis")), con la cual se recuperaron 88 documentos, se importaron al programa especializado de minería de texto VantagePoint y se realizaron operaciones de refinado en los datos, con el objetivo de eliminar inconsistencias, depurar registros duplicados y asociar términos similares, entre otras operaciones. Asimismo, se identificaron tendencias mediante los indicadores cuantitativos: Número de registros, autores representativos, dinámica de publicaciones (artículos por años), afiliación por país a nivel mundial, afiliaciones por instituciones y palabras clave. Se generan también matrices relacionales por medio del programa VOSviewer, que permiten visualizar los resultados e identificar tendencias.

Aunque la ecuación de búsqueda recuperó la menor cantidad de documentos, fue seleccionada debido a la información obtenida durante la revisión bibliográfica previa a la

vigilancia tecnológica. En esa revisión, se observó un mayor potencial del biocombustible en comparación con los productos analizados en el estudio actual. Además, se identificaron mejores propiedades y un campo de estudio más amplio asociado con esta opción.

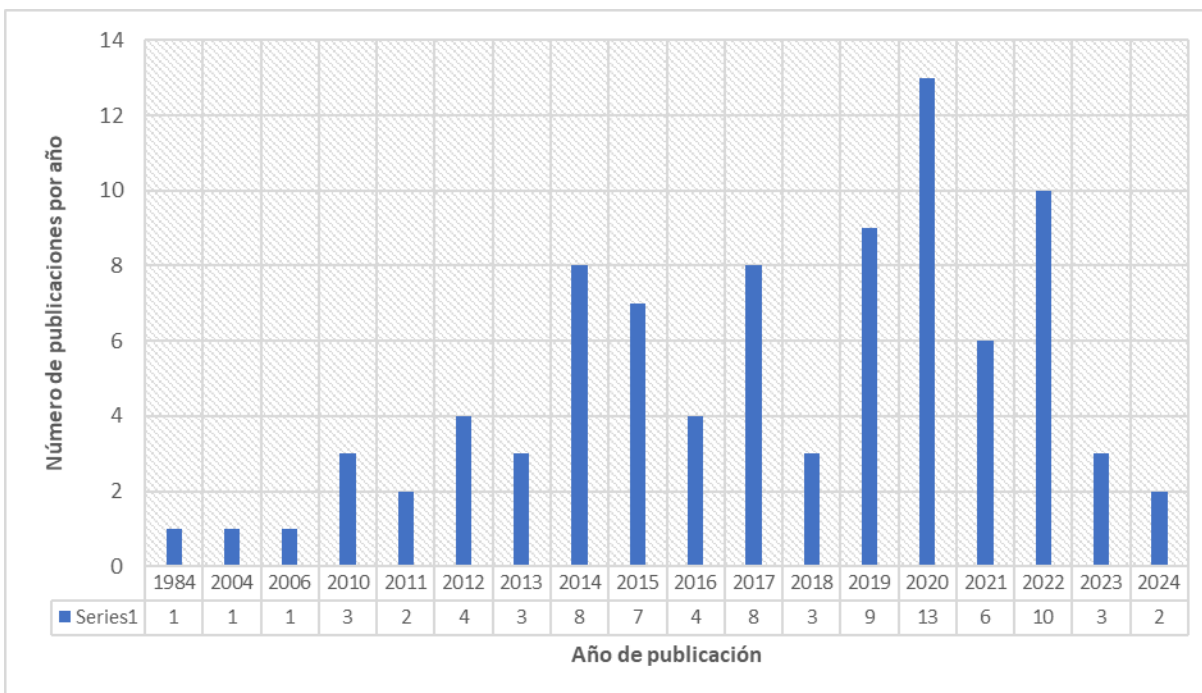
A continuación, se presentan los resultados más relevantes de este análisis cuantitativo:

5.2.1 Indicadores básicos

Estos indicadores abarcan el número de publicaciones por año, países, autores, instituciones y palabras claves a nivel mundial y nacional.

5.2.1.1 Publicaciones por año. En la figura 3 se observa una distribución por años sin ningún tipo de restricción en los periodos de tiempo. Se evidencia que la primera publicación se realizó alrededor del año 1984, sin embargo, se denota que el biobutanol recobró interés en los años 2000 donde a partir de 2004 se presentaron los primeros resultados, y paulatinamente creció el interés por este biocombustible teniendo su pico de publicaciones en el 2020, el cual coincide con la pandemia por coronavirus (COVID-19), donde posteriormente muchos investigadores detuvieron las investigaciones en campo debido a las medidas sanitarias, lo cual refleja la disminución de publicaciones en los años posteriores, por lo que se espera que estas publicaciones aumenten en los próximos años. Sin embargo, se denota que año a año nuevas publicaciones se presentan ante la comunidad científica, lo cual denota que es un tema de interés dentro del área de los biocombustibles.

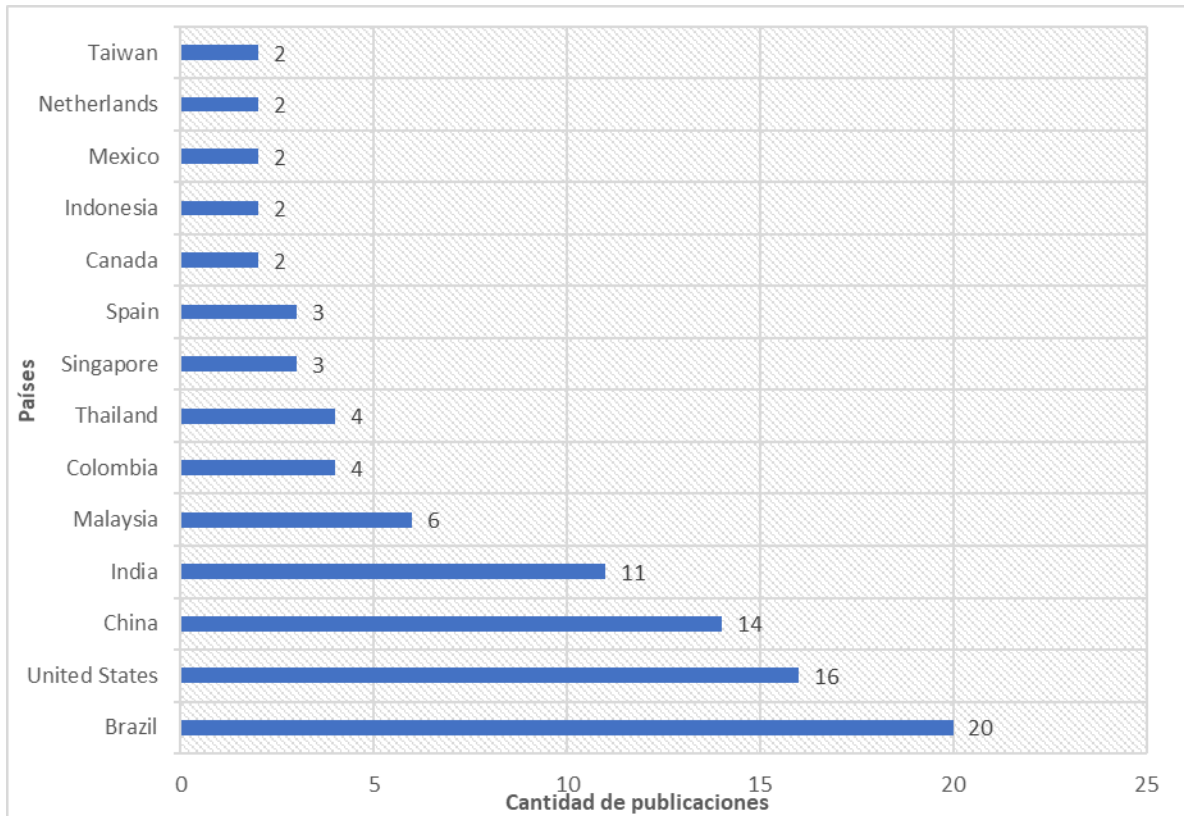
Figura 3. *Publicaciones por año*



Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

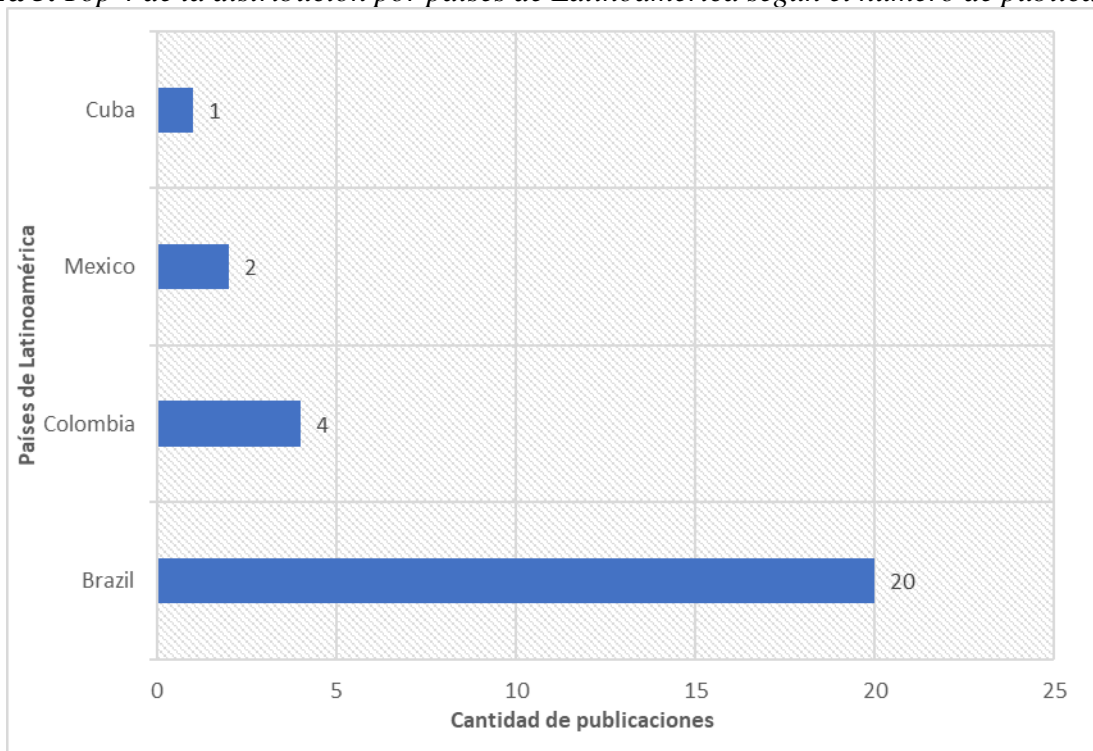
5.2.1.2 Publicaciones por países. En la figura 4 se presenta el top 14 de la distribución por países con mayor número de publicaciones a nivel mundial. Se observa que Brasil es el líder con un 21,98% seguido de Estados Unidos con un 17,59% y China con 15,39%. Esta tendencia se relaciona con el nivel de desarrollo de cada país, de igual manera, Brasil es pionero en producción y uso masivo de biocombustibles con una visión estratégica a largo plazo. Cabe resaltar que Brasil y Estados Unidos, son los dos mayores productores de biocombustibles en el continente americano y en el mundo. Otro dato relevante es la producción de caña de azúcar donde Brasil encabeza la lista como el mayor productor, por esta razón, presenta gran interés en el aprovechamiento de la biomasa.

Figura 4. Top 14 de la distribución por países según el número de publicaciones



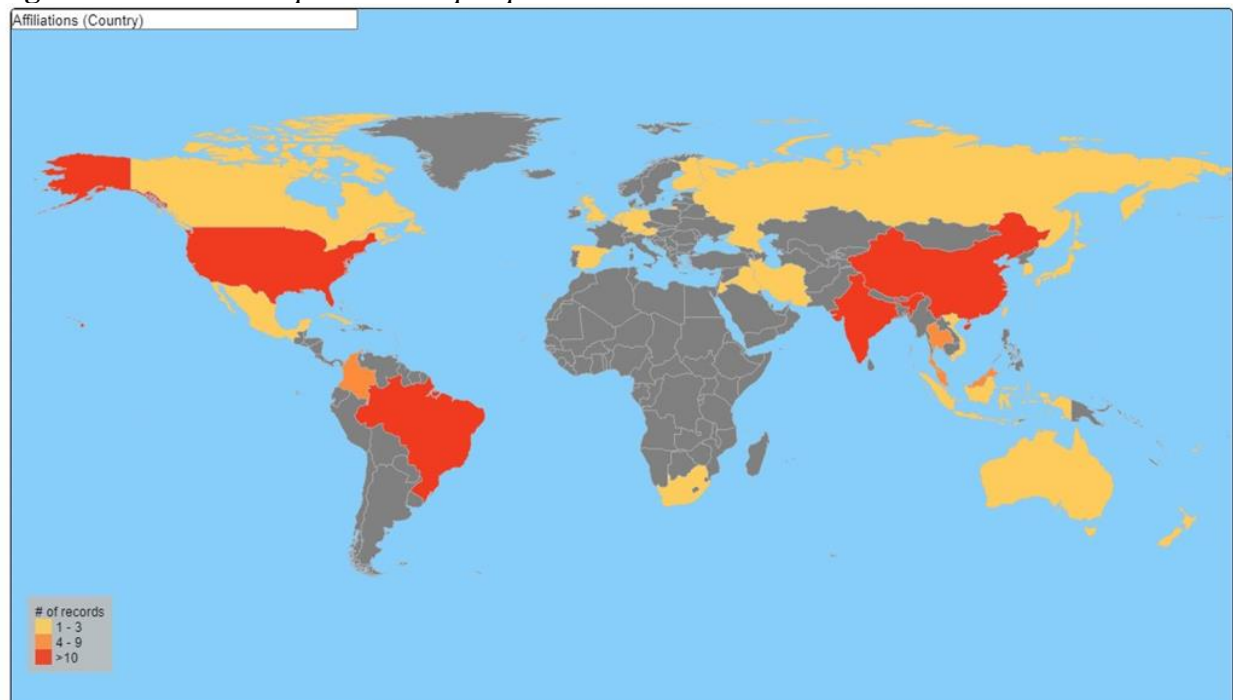
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

En la figura 5 se presenta el top 4 de países de Latinoamérica con mayor número de publicaciones, se observa a Brasil en el primer lugar, lo cual es congruente con la figura 4, en el segundo lugar se encuentra Colombia con cuatro publicaciones, esto se debe a una amplia normativa enfocada en el desarrollo del país en función de salvaguardar la independencia energética nacional, con mejoras en la eficiencia de los procesos de generación de energía y optimización del consumo de combustibles, promoviendo la utilización de energías alternativas. Adicionalmente, la actividad agraria en Colombia constituye uno de los renglones económicos más importantes del país; cultivos como la caña de azúcar y la palma africana abarcan importantes regiones con la ventaja de que se pueden cultivar durante todo el año por el favorecimiento climático del país(Kafarov et al., 2006)

Figura 5. Top 4 de la distribución por países de Latinoamérica según el número de publicaciones

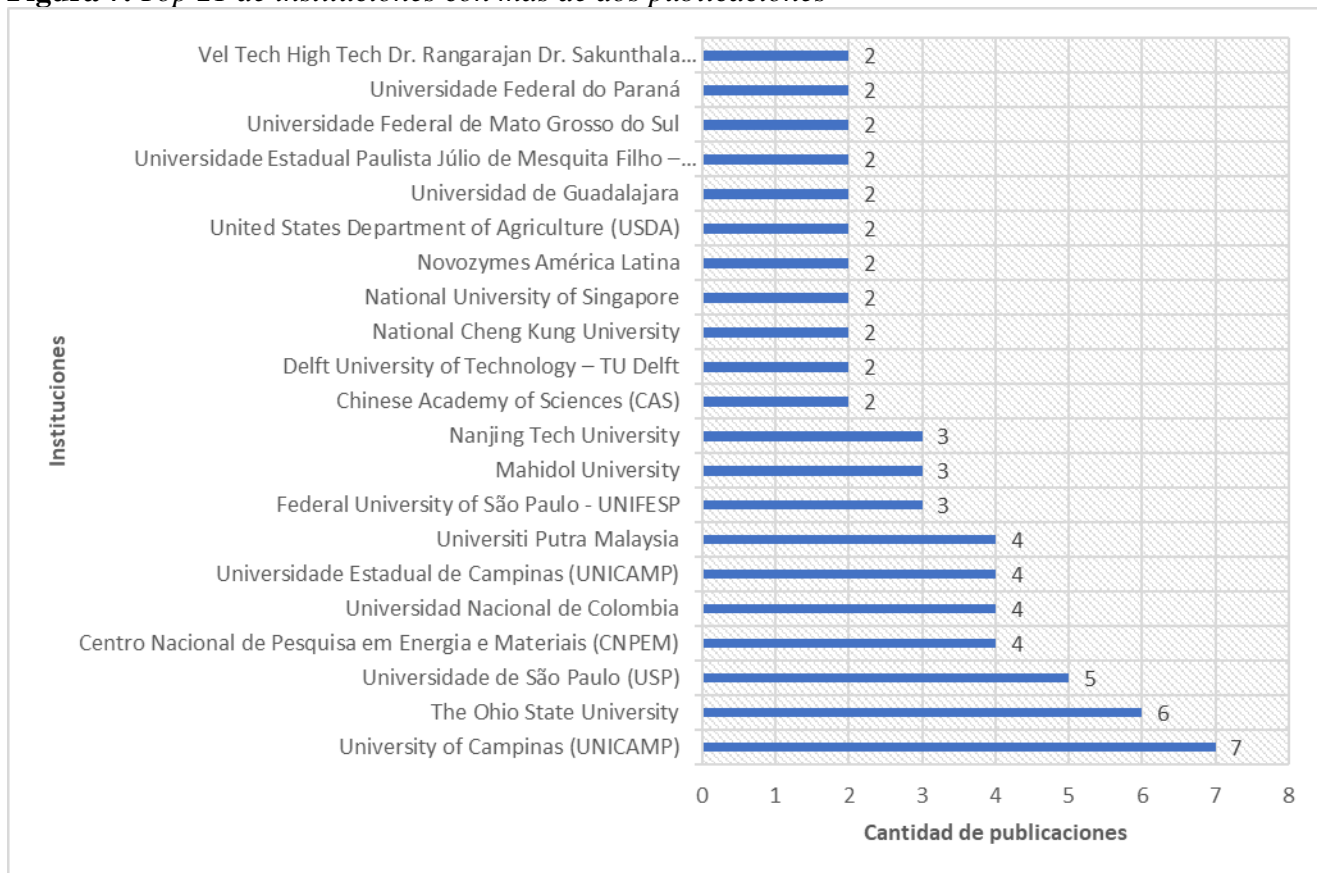
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

En la figura 6 se puede notar la coloración roja, naranja y amarilla de los países que han contribuido a la investigación de butanol como biocombustible a partir de la biomasa. La coloración roja corresponde a aquellos países que tienen mayor número de publicaciones, es decir, más de 10 publicaciones, entre los que resaltan Brasil, Estados Unidos y China y los de color amarillo a los países con menor número de publicaciones. Esto se debe a sus robustas políticas energéticas y en el caso de Brasil y Colombia a una amplia reserva de biomasa residual.

Figura 6. *Densidad de publicación por países*

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

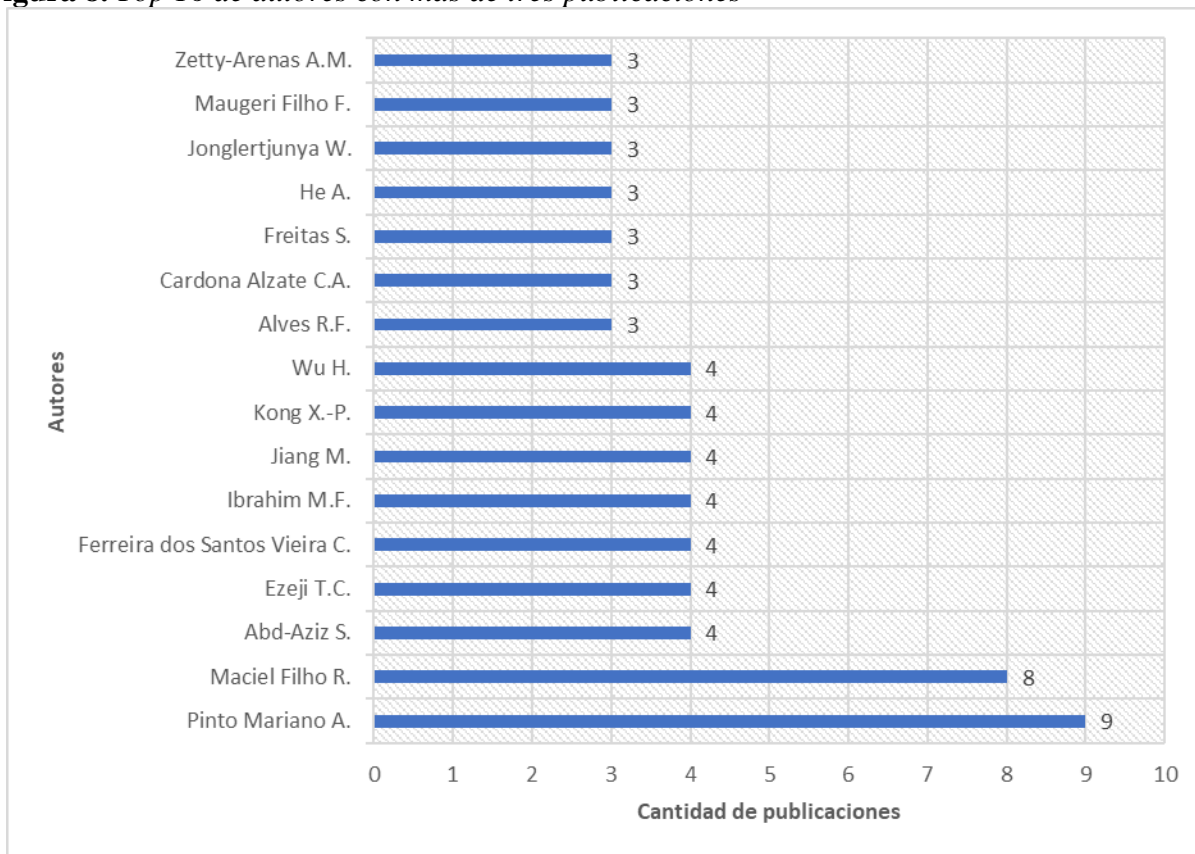
5.2.1.3 Participación por instituciones. La figura 7 muestra el top 21 de instituciones con más de dos publicaciones y lo lidera la University of Campinas (UNICAMP), la cual se encuentra en Brasil, seguido de The Ohio State University de Estados Unidos. Estos resultados son coherentes con los países líderes en este tipo de investigaciones.

Figura 7. Top 21 de instituciones con más de dos publicaciones

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

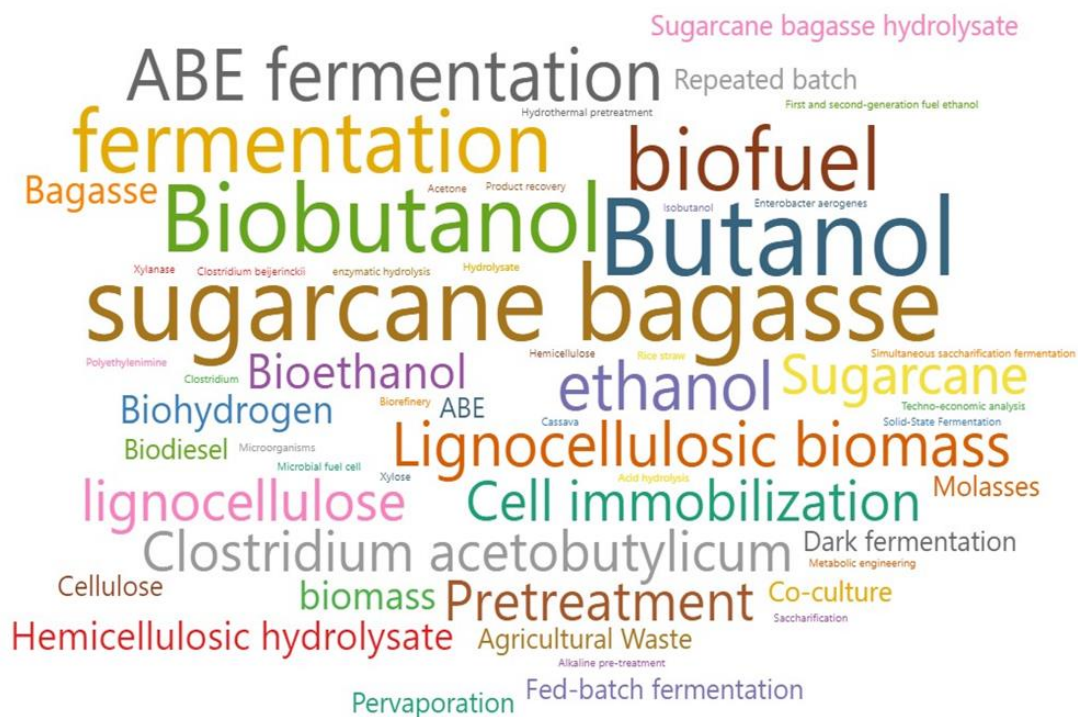
5.2.1.4 Publicaciones por autores. En la figura 8 se presenta el top 16 de autores con más de tres publicaciones. Destacándose el autor Pinto Mariano Adriano, con nueve publicaciones. Perteneciente a la UNICAMP y quien ha centrado sus estudios en biorrefinerías y biotecnología. Dentro de sus investigaciones se encuentra como coautor Rubens Maciel Filho, profesor de Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP. Este autor se presenta de segundo en la lista con ocho publicaciones.

Este resultado tiene relación con lo expuesto en los anteriores indicadores cuantitativos (publicación por instituciones y autores), debido a que los dos pertenecen a la Institución con más investigaciones, la UNICAMP y al país con mayor publicación, el cual es Brasil.

Figura 8. Top 16 de autores con más de tres publicaciones

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

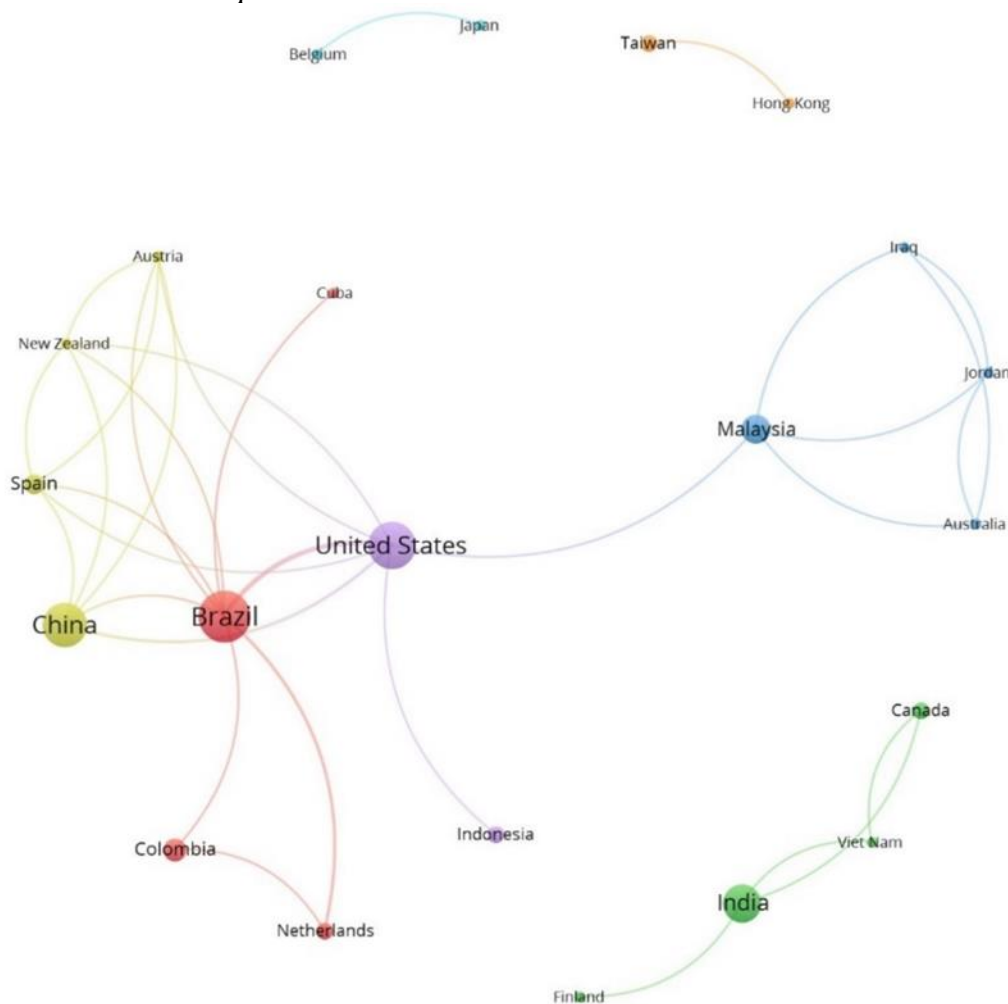
5.2.1.5 Palabras claves. La figura 9, muestra con un tamaño mayor y más centradas las palabras claves con la frecuencia de ocurrencia más alta en los diferentes registros, de las cuales las principales son: butanol, sugarcane bagasse, biobutanol, biofuel, fermentation, ABE fermentation. Estas palabras se encuentran directamente relacionadas con la ecuación de búsqueda.

Figura 9. *Palabras claves*

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

5.2.2 Índices de relación

5.2.2.1 Relación entre países. Se realizó un análisis bibliométrico con el programa VOSviewer como se muestra en la figura 10, donde se observa la colaboración entre países. El tamaño de cada esfera expone el liderazgo relacionado con el tema de estudio del presente proyecto. Se observa una estrecha colaboración entre Brasil, China y Estados Unidos.

Figura 10. *Relación entre países*

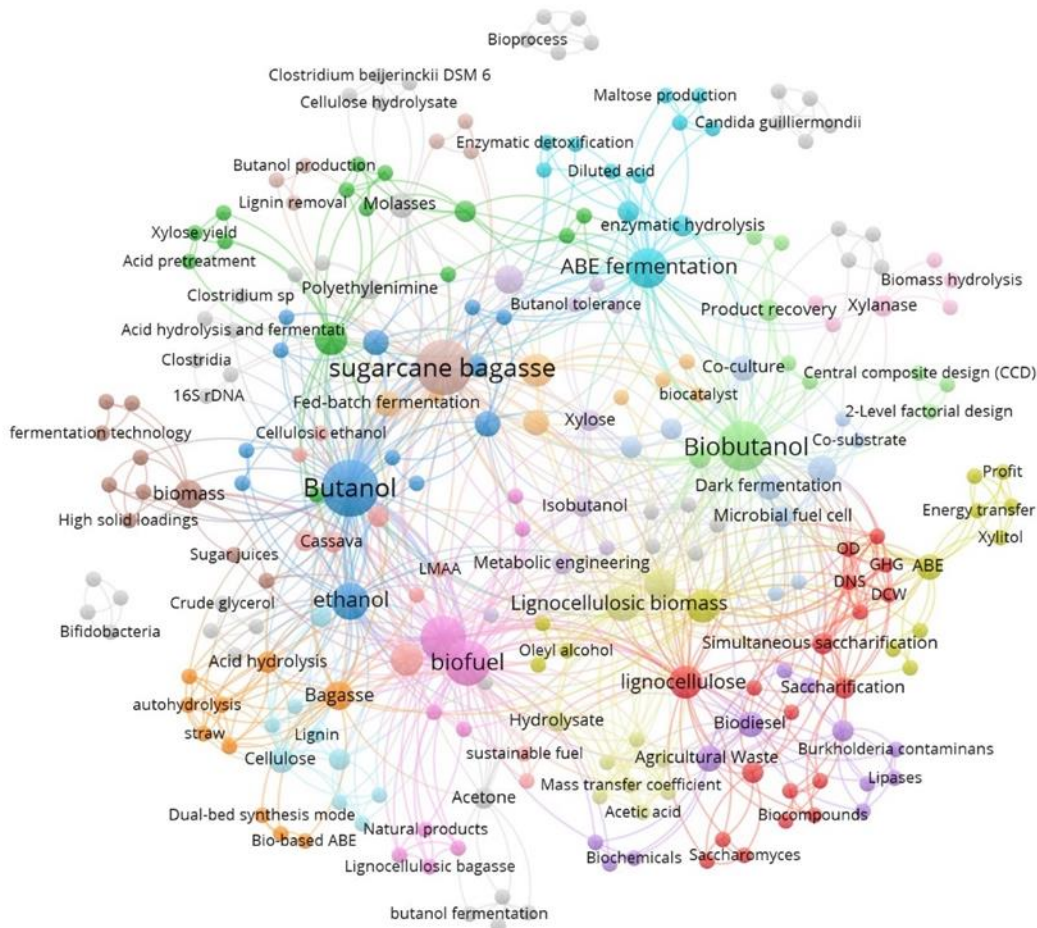
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga

5.2.2.2 Relación entre palabras claves. Se realizó el análisis en el software VOSViewer obteniendo la figura 11, donde se observa que el término más relevante es el butanol o biobutanol como biocombustible y presenta una amplia relación con los procesos de fermentación ABE a partir de biomasa como el bagazo de caña de azúcar.

Adicionalmente, se denota que el bagazo de caña de azúcar presenta un interés superior que el raquis de palma africana en los estudios de transformación de biomasa lignocelulósica en

biocombustibles, lo que implica que hay un gran potencial de investigación para esta materia prima.

Figura 11. *Relación entre palabras claves*

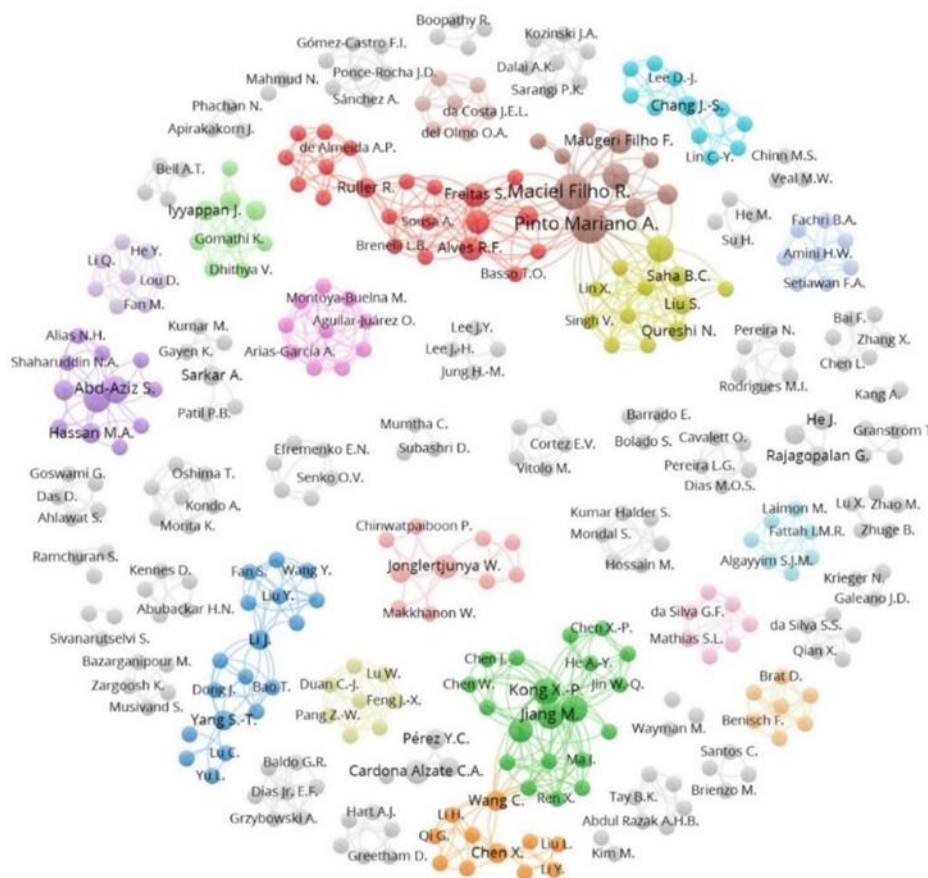


Cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga

5.2.2.3 Relación entre autores. La figura 12 muestra la gran colaboración entre los autores de todo el mundo. Se observan dos redes de coautoría que sobresalen; una liderada por Pinto Mariano Adriano quien cuenta con 8 referencias junto con Rubens Maciel Filho y la otra liderada por Jiang Min, quien cuenta con 4 referencias junto con Kong Xiangping.

Sin embargo, se denota que la mayoría de las investigaciones se están realizando de manera aislada e independiente, lo que demanda mayor integración de la comunidad científica con el fin de compartir y potenciar conocimientos en pro del desarrollo y mejora de la productividad del biobutanol como una opción viable para contribuir en las demandas energéticas de la humanidad por medio de opciones sostenibles.

Figura 12. *Relación entre autores*



Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus, procesados con VantagePoint y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

El butanol surge como una opción superior, especialmente en aplicaciones de motores de combustión interna, gracias a su mayor poder energético y menor presión de vapor, lo que lo hace menos volátil y más fácil de transportar al ser menos higroscópico, lo cual reduce el riesgo de

separación de fases y problemas de rendimiento en motores (Noriega, 2017). Se prefiere el butanol como aditivo sustentable o biocombustible completo en comparación con el bioetanol debido a su alta densidad energética, es decir, que proporciona más energía por volumen, baja inflamabilidad, nula o baja corrosividad y buena miscibilidad con la gasolina (Qureshi et al., 2021). También es menos soluble y más compatible con el motor y el sistema de tuberías actual y no requiere actualización ni modificación (Chen et al., 2024). Otro aspecto interesante es que contiene 25% más de energía en su poder calorífico comparado con el etanol, debido a que tiene cuatro átomos de carbono frente a los dos del etanol, mientras que ambos compuestos tienen un único átomo de oxígeno (Arianny y Ollarves, 2014).

En la actualidad, el butanol se percibe como una alternativa altamente prometedora en la formulación de combustibles para motores de transporte pesado, tales como aviones y motores marinos. Estos estudios son significativos dado que el sector del transporte pesado presenta limitadas alternativas para la descarbonización, a pesar de que más de un tercio de las emisiones de carbono globales provienen precisamente de esta categoría de transporte (Rivera et al., 2023).

El butanol enfrenta varios desafíos, incluido un costo de producción comparativamente alto en relación con el bioetanol. En la fermentación ABE (acetona, butanol, etanol), los rendimientos de butanol suelen ser entre 10 y 30 veces menores que los obtenidos en la fermentación de levadura para la producción de etanol. Además, la acumulación de butanol durante la fermentación puede inhibir la actividad microbiana, lo que disminuye la eficiencia del proceso. La escalabilidad de los procesos de producción de butanol y su rentabilidad son preocupaciones adicionales que deben abordarse para su implementación a gran escala.

No obstante, en los últimos años, ha aumentado el interés en la producción de butanol mediante fermentación ABE, como se evidencia en la literatura científica disponible. Como el

estudio planteado por Nasib Qureshi y compañía, donde emplean como materia prima sólidos de bagazo de sorgo dulce (SSB) en una concentración de $160 \frac{g}{L}$, valor máximo de concentración que el microorganismo *Clostridium beijerinckii* P260 puede tolerar. Adicionalmente, se combinaron con éxito tres de los cuatro pasos del proceso (sacarificación, fermentación y recuperación de producto simultáneas; SSFR) para producir butanol o ABE a partir de SSB concentrado. Los parámetros cinéticos de rendimiento y productividad de ABE fueron $0,39$ y $0,21 \frac{g}{L \cdot h}$ respectivamente. La concentración total de ABE en la corriente recuperada osciló entre $7,91$ y $32,38 \frac{g}{L}$, lo que se esperaba que fuera económicamente viable, ya que no estaban presentes componentes del medio como lignina y células microbianas que dificultaran la recuperación del producto. Este estudio abordó los problemas de inhibición del sustrato y del producto asociados con esta fermentación, al utilizar materia prima de biomasa concentrada y la recuperación simultánea de productos (Qureshi et al., 2021).

En el artículo de revisión titulado *Biobutanol Production from Acetone–Butanol–Ethanol Fermentation: Developments and Prospects*, los autores detallan el progreso de la investigación en la fermentación de butanol. Abarcando desde los microorganismos productores de butanol hasta las vías metabólicas involucradas en su síntesis, así como las materias primas utilizadas en la fermentación ABE y las tecnologías asociadas. Además, anticipan con interés las perspectivas del biobutanol, con el propósito de establecer una base teórica para orientar la investigación futura en el campo de la fermentación del butanol (Lin et al., 2023).

El artículo revisa la producción de butanol, centrándose en las cepas bacterianas productoras de butanol, como *Clostridium acetobutylicum*, *Clostridium beijerinckii*, entre otras. Debido a la citotoxicidad del butanol, las bacterias, entran en un estado latente y se detiene la fermentación. Por lo tanto, para resolver esta problemática, los investigadores han llevado a cabo

varios trabajos de cría de cepas para mejorar la tolerancia al butanol y la producción de bacterias. Actualmente, existen muchos métodos disponibles para mejorar las cepas, como el mejoramiento por mutaciones, el diseño del genoma, la ingeniería evolutiva y la biología sintética. El resumen de estas investigaciones realizado por Lin et al, se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de los diferentes autores que han modificado cepas con el fin de mejorar los rendimientos de butanol

Documento de referencia	Modificación	Cepa original	Cepa modificada	Rendimiento de buanol
Annous et al	mutagénesis química con nitrosoguanidina como mutágeno	Clostridium Acetobutylicum atcc 824	Clostridium Acetobutylicum ba105	18 g/l, 1.8 veces mayor que el de la cepa original
Syed et al	combinaron mutagénesis ultravioleta, mutagénesis con metanosulfonato de metilo y mutagénesis con nitrosoguanidina	Clostridium Acetobutylicum ptcc 23	Clostridium Acetobutylicum mems7	18 g/l, un aumento del 20% respecto a la cepa original
Li et al	mutagénesis por inyección de haz de iones de baja energía y mutagénesis con nitrosoguanidina para inducir mutaciones	Clostridium Beijerinckii 1175	Clostridium Beijerinckii mut3	que produjo 15.8 g/l, un aumento del 46% respecto a la cepa original
Qureshi et al	utilizaron nitrosoguanidina como mutágeno para inducir mutaciones en	Clostridium Beijerinckii	Clostridium Beijerinckii ba101	19 g/l, un aumento del 122.2% respecto a la cepa original

Tomado y adaptado de (Lin et al., 2023)

Actualmente, las cepas con mayores producciones registradas de biobutanol en condiciones de fermentación discontinua son la Clostridium Beijerinckii BA101 caracterizándose por presentar una alta selectividad ABE; y la Clostridium Saccharoperbutylaceticum N1-4 característica por su robustez consumiendo tanto pentosas como hexosas, las cuales llegan a alcanzar producciones superiores a los 20 g/L (Jiang et al., 2014) y (Vela, 2008).

En relación a la síntesis de las vías metabólicas, los investigadores se han propuesto generar cepas sobresalientes con una elevada eficiencia y una marcada tolerancia al butanol mediante el análisis de genes clave, enzimas clave y redes metabólicas. Algunos han ensayado la clonación de los genes enzimáticos esenciales de la ruta de síntesis del butanol en células bacterianas no productoras de butanol, como *E. coli* o levadura, a través de la biología sintética, con el fin de construir artificialmente la ruta de síntesis del butanol (Hussain et al., 2022).

Con el objetivo de eliminar la inhibición del producto y potenciar el rendimiento global de la fermentación ABE, se han empleado diversos métodos y tecnologías fermentativas. Estos incluyen fermentación por lotes, fermentación continua, la separación en línea acoplada a fermentación y el cocultivo.

Las mejoras en la fermentación por lotes o discontinua se centran principalmente en optimizar las condiciones de fermentación y la composición del medio, como la relación carbono/nitrógeno y la fuente de nitrógeno (Lin et al., 2023). En el contexto de la fermentación continua, se han explorado técnicas de inmovilización y reciclaje celular para aumentar la densidad celular en el medio de fermentación, lo que impulsa la producción de butanol. Los métodos comúnmente empleados incluyen la adsorción, la unión covalente y la inclusión. La adsorción se destaca por sus condiciones suaves, facilidad de operación y mínimo impacto en la actividad celular, siendo ampliamente preferida. En los últimos años, se ha recurrido a una variedad de materiales agrícolas desechados, como paja de maíz, fibra de pulpa de madera, esponja vegetal y bagazo de caña de azúcar, para la inmovilización en procesos de fermentación continua (Zhang et al., 2009). Con respecto a la tecnología de reciclaje celular, la atención se ha centrado principalmente en la selección de materiales para las membranas de ultrafiltración como triacetato de celulosa.

Los investigadores han explorado la combinación de diversos métodos de separación in situ con la fermentación de butanol. Entre los métodos comunes se encuentran la extracción líquido-líquido, la extracción de gas, la adsorción y la pervaporación. Además, se han llevado a cabo investigaciones en tecnología de cocultivo, que es una técnica fermentativa que aprovecha las vías metabólicas entre diferentes cepas de microorganismos para alcanzar objetivos específicos de fermentación o crecimiento mediante interacciones sinérgicas. Esta novedosa tecnología fermentativa puede lograr efectos similares sin necesidad de recombinación compleja de ADN o biología sintética. En esencia, el cocultivo replica la interacción simbiótica natural entre microorganismos, donde se establece una simbiosis mediante el intercambio de metabolitos. La interacción metabólica es común en las comunidades microbianas, y el objetivo clave radica en diseñar una comunidad microbiana estable. Las estrategias habituales incluyen el uso de cepas con preferencias diversas de fuentes de carbono para reducir la competencia interespecífica y fomentar relaciones de cooperación que incrementen la correlación entre cepas (Lin et al., 2023).

5.3 Condiciones de operación del fermentador

Para definir los parámetros fundamentales de la biosíntesis del butanol, es necesario tener claro el proceso, el cual se resume en la siguiente figura:

Figura 13. Diagrama de proceso de fermentación ABE



La fermentación ABE al ser estrictamente anaerobio, requiere de nitrógeno para mantener fuera del proceso cualquier indicio de oxígeno. Antes de iniciar el proceso de fermentación es necesario definir las características del alimento de microorganismo elegido para realizar el proceso de fermentación, y una vez determinado este parámetro se debe definir el microorganismo encargado de llevar a cabo la biosíntesis del producto elegido (biobutanol) junto con sus respectivas condiciones de fermentación.

5.3.1 Corriente de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar y raquis de palma africana

El bagazo de caña de azúcar y el raquis de palma africana son subproductos de dos de las principales agroindustrias del país, teniendo una amplia disponibilidad de esta materia prima. Diversos estudios se han enfocado en el aprovechamiento de estos productos a partir de su acondicionamiento usando procesos de hidrólisis, buscando mejorar la conversión de polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa en azúcares de más fácil aprovechamiento para los microorganismos, como lo es la glucosa. Teniendo esto como referencia, se realizó un análisis bibliográfico para determinar los mejores procesos de hidrólisis de estas materias primas y tomar estos resultados como referencia para alimentar el fermentador.

5.3.1.1 Hidrolizado de bagazo de caña de azúcar. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) pertenece a la familia de las gramíneas, siendo la materia prima de productos como el azúcar, etanol y en el caso de Colombia, de la panela. El bagazo de la caña de azúcar (residuo sólido de la caña de azúcar luego de la extracción de su jugo), es un subproducto de bajo aprovechamiento, que anualmente genera toneladas de desechos a lo largo y ancho del país, siendo utilizado principalmente en la cogeneración de energía dentro del proceso productivo. Este residuo presenta un potencial enorme como materia prima para la obtención de un sin número de productos valiosos en la industria biotecnológica.

En la tabla que se relaciona a continuación, se muestra su caracterización:

Tabla 6. *Caracterización del bagazo seco de caña de azúcar*

Componente	Contenido (%)
materia seca	94,81 +/- 0,32
proteínas	1,75 +/- 0,09
azúcares residuales	0,34 +/- 0,02
celulosa	62,25 +/- 0,89
hemicelulosa	7,99 +/- 1,01
lignina	12,49 +/- 0,08
solubles	17,28 +/- 0,04

Nota: cada valor es el promedio de tres réplicas, expresado en base seca
Tomado de (Chandler et al., 2012)

La celulosa, junto a la hemicelulosa y la lignina son los polisacáridos de mayor presencia en el bagazo, siendo el 72% de su composición aproximadamente, lo que lo hace atractivo, junto

a su bajo costo, para usarse como materia prima en la producción de azúcares reductores, con el fin de convertirlos posteriormente en productos valiosos como el butanol.

El rendimiento de la hidrólisis relacionando la cantidad de glucosa obtenida por kilogramo de bagazo utilizado, de acuerdo a la investigación realizada por Gustavo Corea entre otros (Corea y Morales, 2019), está dada por 458 g de Glucosa por cada kilogramo de bagazo utilizado en el proceso.

La caracterización de la carga al biorreactor se determina conociendo la caracterización de los azúcares fermentables una vez finaliza la hidrólisis del bagazo. De acuerdo a la revisión bibliográfica, por lo general, la concentración de glucosa una vez el bagazo está hidrolizado es de 5g Glucosa/litro (Chandler et al., 2012). Siendo necesario someter este fluido a una concentración por medio de una evaporación al vacío, para concentrar los azúcares y llevarlos hasta 50g Glucosa/litro.

5.3.1.2 Hidrolizado de raquis de palma africana. La palma africana (*Elaeis Guineensis*) es uno de los principales agroindustriales del Colombia, los frutos de esta palma son la materia prima para la producción de aceite de palma y de aceite de palmiste. De este proceso agroindustrial se generan varios productos lignocelulósicos como hojas de palma, raquis (racimos sin frutos), torta de palmiste y cuescos.

El raquis, o racimos vacíos se obtienen del proceso de desfrute de los racimos de palma por medio de una separación mecánica, donde los frutos desprendidos se transportan a un digestor y el raquis es descargado en una banda, para dirigirse a una picadora, con el fin de usarse posteriormente en la cogeneración de energía que necesita la planta. Cabe aclarar, que solo se usa

una fracción del raquis en este proceso, generándose grandes cantidades de este producto dentro de las plantas.

Los altos contenidos de celulosa del raquis han hecho que la industria de la biotecnología se fije en su potencial, como materia prima para la producción de diversos productos. En la tabla 7 se muestra su caracterización fisicoquímica.

Tabla 7. *Caracterización fisicoquímica del raquis de palma africana en base seca*

Componente	Porcentaje en base seca (%)
celulosa	46,77± 5,39
hemicelulosa	17,92 ± 4,89
lignina	4,15 ± 0,53
cutina y cenizas insolubles	31,16 ± 4,55

Tomado de (Mejía, 2012)

El rendimiento de la hidrólisis relacionado con la cantidad de glucosa obtenida por kilogramo de raquis utilizado, de acuerdo a la investigación realizada por Diana Paola Díaz (Díaz, 2007), está dada por 307 g de Glucosa por cada kilogramo de raquis utilizado en el proceso. Para determinar la caracterización de la carga al biorreactor se debe conocer la caracterización de los azúcares fermentables una vez finaliza la hidrólisis del raquis, la cual es de 3g Glucosa/litro. Siendo necesario someter este fluido a una concentración por medio de una evaporación al vacío, para concentrar los azúcares y llevarlos hasta 50g Glucosa/litro.

5.3.2 Definición de los parámetros de fermentación

5.3.2.1 Elección del microorganismo. El parámetro fundamental para la elección del microorganismo es la rápida y eficiente conversión de glucosa en butanol. Como ya se indicó anteriormente existe una amplia variedad de microorganismos capaces de sintetizar butanol, sin embargo, los más importantes son sin duda *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 y *Clostridium beijerinckii* BA101. En la tabla 8, se resume la capacidad de conversión de estas cepas en Butanol y en general ABE a partir de los estudios realizados por (García, 2017) y (Vela, 2008).

Tabla 8. Comparación producción de Butanol entre las cepas *Clostridium beijerinckii* y *Clostridium saccharoperbutylacetonicum*

Parámetro	<i>Clostridium Beijerinckii BA101</i>	<i>Clostridium Saccharoperbutylacetonicum N1-4</i>
glucosa inicial (g/l)	62,1	96
biomasa (g/l)	3,28	12,07
butanol (g/l)	19,7	23,1
acetona (g/l)	4,8	12,06
etanol (g/l)	0,8	0
ácido acético (g/l)	0,0	1,15
ácido butírico (g/l)	0,2	0,57
tiempo fermentación (horas)	72	43,5
ABE total producido (g/l)	25,3	35,16
conversión de glucosa en abe (%)	41%	37%
producción abe hora (g/l*h)	0,35	0,81

Tomado y adaptado de (García, 2017) y (Vela, 2008)

Teniendo en cuenta la información anterior, la cepa *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 muestra varias ventajas sobre la *Clostridium Beijerinckii* BA101, presentando una producción de ABE por hora ($\text{g/l}\cdot\text{h}$), que supera por más del doble para una conversión de glucosa ligeramente menor, lo cual la hace más eficiente. Adicionalmente, según diversos autores la capacidad de esta cepa para consumir tanto hexosas y pentosas aumentan su potencial productivo y rendimiento (Grisales, 2020). Otro factor a tener en cuenta es la mayor tolerancia a la glucosa, permitiendo concentraciones iniciales más altas y por ende mayor productividad final de ABE, y, por último, al no sintetizar etanol dentro del proceso requiere de menos equipos de separación y purificación de los productos valiosos disminuyendo así los costos globales de producción.

5.3.2.2 Condiciones óptimas de fermentación ABE para *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4. Con el objetivo de obtener la mayor productividad del microorganismo, es necesario definir las condiciones óptimas de cultivo, siendo variables críticas del proceso la temperatura, la presencia o ausencia de oxígeno, el pH entre otros. Estos parámetros se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. *Parámetros óptimos de cultivo *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4*

Condición óptima de cultivo	Parámetro
Temperatura	32 °C
pH	Varía entre 5 y 6,5 en función de la fase en que se encuentre la fermentación
Presión de operación	1 atmósfera
Agitación	72 rpm
Presencia/Ausencia de oxígeno	Estrictamente anaerobio

Tomado de (Vela, 2008)

Al ser un proceso estrictamente anaerobio es necesario introducir nitrógeno gaseoso al proceso hasta conseguir estas condiciones. Adicionalmente, es necesario agregar antiespumante al proceso para evitar así la formación de espumas que interfieren en el proceso y pueden afectar la eficiencia de la conversión de la glucosa en Butanol.

La fermentación ABE suele estar inhibida por los productos, principalmente por el butanol que a medida que se acumula en el medio de cultivo disminuye la velocidad de fermentación llegando a detenerla. El microorganismo *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 tiene una tolerancia de hasta 25g/L de butanol en medio de fermentación (Qureshi y Blaschek, 2001)

5.4 Diseño mecánico del fermentador

El diseño del fermentador debe considerar diversos aspectos clave, entre los cuales se incluyen: el tipo de reactor, la geometría, el material de construcción, las condiciones operativas, y la gestión de las corrientes de entrada y salida del sistema. Además, es fundamental integrar sensores operativos adecuados, sin perder de vista la simplicidad de uso, la estética y la ergonomía. Adicionalmente, se considera el análisis de la vigilancia tecnológica realizada, con el objetivo de incluir las condiciones operativas óptimas del fermentador. Esto garantiza un entorno adecuado para el desarrollo de la cepa *Clostridium saccharoperbutylaceticum* N1-4, permitiendo así maximizar el rendimiento y la conversión de glucosa en biobutanol y otros subproductos valiosos.

Por tal motivo el diseño del biorreactor se realizó en 4 etapas, diseño del tanque de fermentación, diseño del intercambiador de calor, condiciones de operación y diseño del agitador, y las adaptaciones de corrientes de entrada y accesorios asociados al proceso.

5.4.1 *Diseño del tanque de fermentación*

Teniendo en cuenta el objetivo principal del presente proyecto el cual es diseñar un equipo que pueda ser usado como prototipo piloto en la investigación del comportamiento de fermentaciones ABE de producción de solventes como butanol teniendo como carga el producto concentrado de las hidrólisis de diferentes materiales lignocelulósicos. Se determinó que su operación será tipo Batch y que tendrá un volumen de operación de 5 litros. Si bien es cierto, la literatura recomienda la fermentación en proceso continuo para disminuir la inhibición por butanol, no obstante, el volumen de operación es pequeño y se tendrían que manejar caudales de entrada y salida muy bajos lo que implicaría un proceso más complejo.

Considerando la formación de espumas y por seguridad se ajustó el volumen real del tanque en un 20% siendo de 6 litros o lo que es igual 6000 cm³.

Asumiendo que el biorreactor es un cilindro perfecto, y que teniendo en cuenta el Manual del Ingeniero Químico (Perry y Green, 2001) recomienda que la altura sea 3 veces el diámetro, se tiene la siguiente ecuación para el dimensionamiento del tanque:

$$V = \frac{3*\pi*D^3}{4} \quad \text{Eq 10}$$

De esta manera al resolver la ecuación 10, tomando el volumen del tanque como 6000 cm³, se determinó que el diámetro del tanque será de 13,65 cm y la altura del mismo será de 40,97 cm. Ajustando los valores obtenidos se tomará un diámetro de 14 cm y una altura de 40 cm, dando como resultado un volumen final de 6157 cm³

5.4.1.1 Cálculo espesor de las paredes. El espesor de las paredes del tanque de fermentación para la producción de Butanol, se determina primero definiendo varios parámetros como son la presión de diseño, la temperatura de diseño, espesor mínimo, material empleado, la tensión máxima admisible y por último la eficiencia de la soldadura.

5.4.1.1.1 Presión de diseño. La presión de diseño por definición debe ser superior a la presión de operación del proceso, la cual se mencionó anteriormente y es de una atmósfera (14,7psi). Para definir la presión mínima de diseño, se toma como referencia el código americano de diseño ASME, donde se establece que se debe tomar la mayor de las siguientes condiciones:

- $P \geq 1,1 * \text{Presión de operación (kg/cm}^2\text{)}$
- $P \geq \text{Presión de operación} + 2 \text{ kg/cm}^2$
- $P \geq 3,5 \text{ kg/cm}^2$

Evaluando las condiciones se definió que la presión de diseño será de $3,5 \text{ kg/cm}^2$ (49,792 psi)

5.4.1.1.2 Temperatura de diseño. La temperatura de diseño debe ser superior a la temperatura de fermentación óptima del proceso, que como ya se definió en el presente proyecto es de 32°C . Considerando que la temperatura de diseño es la temperatura de operación más 20°C , la temperatura de diseño será 52°C (125°F)

5.4.1.1.3 Material empleado. Para la construcción del biorreactor es necesario un acero inoxidable con muy buena resistencia a la corrosión y una alta soldabilidad. Por este motivo se eligió el acero inoxidable AISI 316L una aleación austenítica de cromo, níquel y molibdeno, además de ser un acero con un bajo contenido de carbono. Por otro lado, contiene otras trazas de

elementos como el Titanio, Niobio y Tantalio lo que le permite ser altamente resistente a la corrosión y a las picaduras.

El acero inoxidable AISI 316L tiene las siguientes características de diseño:

- $\sigma_{\text{elasticidad}}$: 38000 psi
- σ_{rotura} : 80000 psi

5.4.1.1.4 Espesor mínimo de la pared (t_{min}). El espesor mínimo de pared, es el espesor mínimo fijado para la carcasa envolvente y los fondos, excluyendo el sobre espesor de corrosión, y teniendo el código ASME para aceros inoxidables, material elegido para la construcción del biorreactor, este parámetro es de 3 mm.

5.4.1.1.5 Tensión máxima admisible (S). El espesor del tanque debe ser capaz de soportar la presión interna sin deformarse y estas características dependen del material utilizado para su construcción y el coeficiente de seguridad que se adopte. Para definir este parámetro, se tomará como referencia el código ASME, sección VIII, donde se establece que la tensión máxima admisible a la temperatura de diseño, es el mínimo de los siguientes parámetros:

$$\frac{2}{3} * \sigma_{\text{elasticidad del material}} = 25333,33 \text{ psi} \quad \text{Eq 11}$$

$$\frac{3}{8} * \sigma_{\text{rotura del material}} = 30000 \text{ psi} \quad \text{Eq 12}$$

Teniendo esto en cuenta, la máxima tensión admisible del material (S), es 25333,33 psi.

5.4.1.1.6 Eficiencia de la soldadura (E). La unión de las láminas de acero, se realiza por medio de la soldadura, y un manejo eficiente de este recurso es indispensable, para evitar fallas

estructurales en la operación del equipo. Siguiendo con los lineamientos del código ASME, el tipo de soldadura que requiere es de tipo doble cordón, y teniendo en cuenta las características del biorreactor objeto de estudio de la presente tesis, se tomó una eficiencia de la soldadura (E) de 0,85.

5.4.1.2 Cálculo del espesor para el casco. Se determina el espesor teniendo en cuenta al esfuerzo longitudinal y el esfuerzo circunferencial del tanque, debido a la geometría del equipo. El espesor del casco será el factor más alto de estos dos parámetros, considerando las recomendaciones del código ASME, además de ser el caso hipotético más desfavorable, el código ASME presenta la siguiente ecuación:

$$t_{longitudinal} = \frac{P * R_{IC}}{2 * S * E + 0,4 * P} (in) \quad \text{Eq 13}$$

Donde:

- $t_{longitudinal}$: espesor del casco debido al esfuerzo longitudinal
- P: presión de diseño (49,792 psi)
- R_{IC} : radio interior con corrosión
- S: tensión máxima admisible (25333,33 psi)
- E: eficiencia de la soldadura (0,85)

El radio interior con corrosión viene dado por la siguiente ecuación:

$$R_{IC} = R_{INTERNO} + c (in) \quad \text{Eq 14}$$

El radio interno del equipo es de 7cm (2,7559in), y c, es el sobre espesor de corrosión, que al ser un recipiente de acero inoxidable es igual a 3mm (0,1180 in) como ya se indicó anteriormente. Por tanto, el radio interior con corrosión es de 2,8739 in.

Por tanto, reemplazando los parámetros especificados en la ecuación 13, se tiene:

$$t_{longitudinal} = \frac{49,792psi * 2,8739in}{2 * 25333,33psi * 0,85 + 0,4 * 49,792psi} = 0,0033in \quad \text{Eq 15}$$

Para determinar el espesor del casco debido al esfuerzo circunferencial, el código ASME presenta la siguiente ecuación:

$$t_{circunferencial} = \frac{P * R_{IC}}{S * E - 0,6 * P} (in) \quad \text{Eq 16}$$

Reemplazando los parámetros especificados en la ecuación 16, se tiene:

$$t_{circunferencial} = \frac{49,792psi * 2,8739in}{25333,33psi * 0,85 - 0,6 * 49,792psi} = 0,0066in \quad \text{Eq 17}$$

Teniendo en cuenta que tanto el espesor del casco debido al esfuerzo longitudinal, como el espesor debido al esfuerzo circunferencial, son menores que el espesor mínimo de diseño, se tomará este último como espesor del casco del tanque biodigestor.

5.4.2 Diseño del intercambiador de calor

Mantener la temperatura de operación en su punto más óptimo es un factor relevante en el desarrollo de la fermentación ABE, además de ser un factor determinante para que el microorganismo pueda llevar a cabo una buena producción de butanol.

Como ya se definió anteriormente, la fermentación ABE, es la sumatoria de varias fermentaciones que se llevan a cabo en simultáneo dentro del proceso, por lo que es necesario conocer las entalpías de reacción (ΔH°) de las principales reacciones que intervienen dentro del proceso. Estos valores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10. *Entalpía de reacción reacciones ABE*

Reacción	ΔH° reacción (kJ/mol glucosa)
Glucosa \rightarrow ácido acético	+ 94,0
Glucosa \rightarrow ácido butírico	- 45,4
Glucosa \rightarrow acetona	+ 135,3
Glucosa \rightarrow butanol	- 127,1

Tomado de (Vela, 2008)

Teniendo en cuenta los rendimientos reportados por Vela, Francisco, para *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 y el volumen de reacción, el cual es de 5 litros, y considerando los pesos moleculares de cada uno de los productos obtenidos, se determinaron las moles producidas de los compuestos a lo largo del proceso, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. *Moles de productos generados para 5 litros*

Producto	Gramos producidos (g / 5 litros)	Peso molecular (g/mol)	Moles producidas (mol / 5 litros)
Butanol	115,5	74,12	1,558
Acetona	60,3	58,08	1,038
Ácido acético	5,75	60,05	0,096
Ácido butírico	2,85	88,11	0,032

Para calcular las moles de glucosa consumidas durante el proceso, se toman como referencia las ecuaciones estequiométricas presentadas en el numeral 6.1.4. *Producción de biobutanol* y se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. *Moles de glucosa consumidas dentro del proceso*

Producto	Moles de glucosa consumidas
Butanol	1,5583
Acetona	1,0382
Ácido acético	0,0479
Ácido butírico	0,0323

Una vez determinadas las moles de glucosa consumidas dentro del proceso se multiplica este valor por las entalpías de reacción de la tabla 10, para de esta manera determinar la cantidad de calor generado o consumido dentro de la fermentación. El resumen se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. *Calor generado o consumido dentro del proceso*

Producto	Calor generado o consumido (KJ)
Butanol	- 198,0599
Acetona	+ 140,4685
Ácido acético	+ 4,5026
Ácido butírico	- 1,4664
Total	- 54,5552

Teniendo en cuenta la información anterior, al estar frente a un proceso exotérmico, es necesario implementar un enfriador para mantener la temperatura constante. Considerando que el calor generado durante el proceso es de -54,5552kJ (-13,0389 Kcaloría) y que el tiempo de fermentación es de 43,5 horas, se determinó que la tasa de generación de calor es de -1,2541 kJ/hora (-0,2997 kCalorías/hora).

Se determinó que se empleará agua como refrigerante, por lo que es necesario calcular el flujo másico de refrigeración, el cual se calcula usando como base la siguiente ecuación termodinámica:

$$Q = m * C_p * (T_{entrada} - T_{salida}) \quad (kcal/h) \quad \text{Eq 18}$$

Donde:

- Q= potencia calorífica, en kcal/h.
- m= caudal másico de agua, en kg/h.
- C_p = capacidad calorífica del agua, en kcal/(kg°C)
- $T_{entrada}$ = temperatura de entrada del agua, en °C
- T_{salida} = temperatura de salida del agua, en °C

Despejando la ecuación 18 en función de la masa y reemplazando, se tiene:

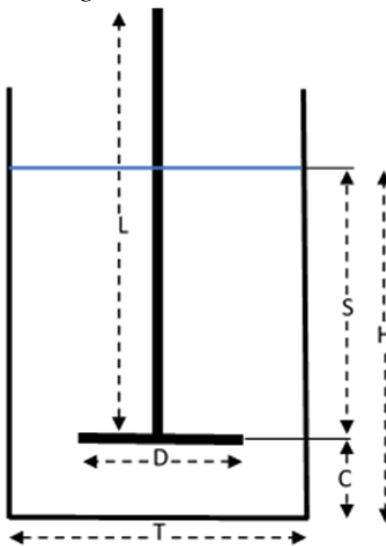
$$m = \frac{Q}{C_p \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}})} = \frac{-0,2997 \text{ kcalorías/hora}}{1 \frac{\text{kcaloría}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot (20^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})} = 0,0249 \text{ kg/hora} \quad \text{Eq 19}$$

Considerando la densidad del agua, se determinó que el flujo de masa de agua que debe reemplazarse cada hora es de 25ml aproximadamente. Por tal motivo, se tomó un sistema de refrigeración tipo chaqueta, con una camisa de enfriamiento, donde el flujo de agua será variable, operándose a partir de un controlador que tomará la lectura de la temperatura del fermentador a partir de una termocupla y manejará el flujo de agua de acuerdo a las necesidades del sistema.

5.4.3 Diseño del sistema de agitación

El diseño del sistema de agitación requiere de ciertos parámetros que están relacionados directamente con la geometría del tanque, los cuales son la distancia entre la primera turbina y el fondo del tanque, la longitud del eje, el tipo de turbina junto al diámetro de la turbina, y, por último, el número de turbinas. En la figura 14 se muestran los parámetros de diseño del agitador.

Figura 14. Parámetros de diseño del agitador



5.4.3.1 Distancia entre la primera turbina y el fondo del tanque (C). La distancia entre la primera turbina y el fondo del tanque está dada por la relación $T/3$ donde, T es el diámetro del tanque, el cual fue definido anteriormente como 14 cm. Por tanto, la distancia sería de 4,6 cm.

5.4.3.2 Longitud del eje (L). La longitud del eje, es la distancia entre la tapa y la primera turbina, la altura del tanque es de 40 cm, por lo tanto, la longitud del eje es de 35,4 cm.

5.4.3.3 Tipo de turbina. Se tomará, una turbina de palas planas, con 6 aspas. El diámetro de la turbina (D), al igual que la distancia entre la primera turbina y el fondo es igual a $T/3$, por tanto, el diámetro de la turbina (D) es de 4,6 cm.

5.4.3.4 Determinación número de turbinas. Se establece la distancia entre la línea de llenado y la última turbina, este parámetro se denominará S . Para determinar la altura de llenado, se tiene en cuenta que el fermentador está diseñado para operar con 5 litros de alimentación, por tanto, este parámetro estaría dado por la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4 \cdot V_{\text{llenado}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 5000 \text{ cm}^3}{\pi \cdot (14 \text{ cm})^2} = \frac{20000 \text{ cm}^3}{\pi \cdot 196 \text{ cm}^2} = 32,5 \text{ cm} \quad \text{Eq 20}$$

$$S = \frac{2 \cdot T}{3} = \frac{28 \text{ cm}}{3} = 9,33 \text{ cm} \quad \text{Eq 21}$$

Considerando que la primera turbina está a 27,9 centímetros de profundidad con respecto de la altura de llenado, y que el parámetro S indica que la última turbina debería estar a 9,33 cm de la superficie, y que se debe evitar cualquier gradiente de concentración de solventes y temperatura dentro del fermentador, se decidió utilizar 3 turbinas, las cuales estarán a 9 cm entre sí.

5.4.4 *Diseño de la tapa*

La tapa del biorreactor se construirá con lámina de acero inoxidable tipo AISI 316L, con un espesor de 4 mm, teniendo en cuenta que será sujeta a perforaciones de las diferentes adaptaciones del sistema. Además de ser el soporte del sistema de agitación. Adicionalmente se considera que debe contar con un sistema de cierre hermético que impida la entrada de aire al sistema, para mantener las condiciones del cultivo estrictamente anaerobias.

Dentro de las adaptaciones del sistema a realizar se tiene:

5.4.4.1 Sensores de control. Con el objetivo de mantener el proceso en las mejores condiciones de operación es necesario adecuar cuatro sensores en el tanque de operación. Los cuales son:

5.4.4.1.1 *Sensor de temperatura.* Este sensor será una termocupla, la cual estará directamente ligada con el sistema de refrigeración del proceso, buscando mantener una temperatura de fermentación de 32°C.

5.4.4.1.2 *Sensor de pH.* Para mantener un ambiente de fermentación controlado, es necesario implementar un sensor de pH.

5.4.4.1.3 *Sensor de presión.* Se instalará un manómetro para controlar la presión interna del tanque.

5.4.4.1.4 Sensor de oxígeno. La fermentación ABE para *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 es estrictamente anaerobia, por lo tanto, conocer la concentración de oxígeno dentro del medio del cultivo es un factor crucial para el adecuado desempeño del proceso, controlar el desarrollo de posibles microorganismos contaminantes de carácter aerobio que puedan ingresar al sistema y de esta manera obtener una buena concentración.

5.4.4.2 Sistemas de alimentación. Al tanque de fermentación entran dos tipos de corrientes, una líquida y una gaseosa.

5.4.4.2.1 Corriente líquida. En la corriente de alimentación se integrará una entrada por la tapa para una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada la cual llegará hasta el fondo el tanque, cuidando que no esté en contacto con el sistema de agitación. Por medio de esta corriente ingresará el flujo de concentrado de glucosa, proveniente de los hidrolizados del bagazo de caña de azúcar y del raquis de palma africana, además de ser el sistema de carga del inóculo del microorganismo al sistema.

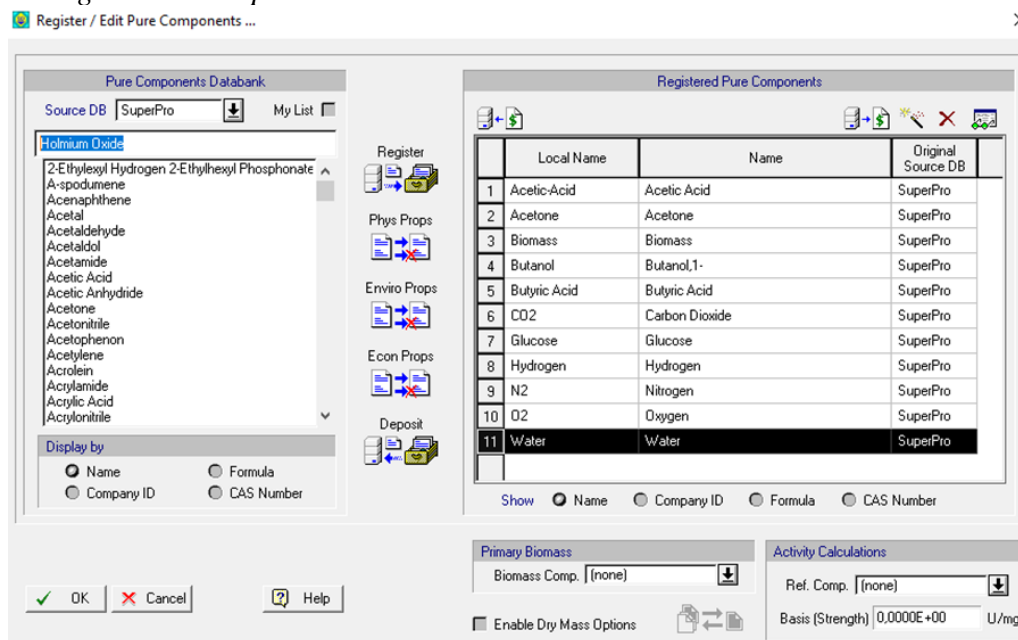
5.4.4.2.2 Corriente gaseosa. Con el fin de regular los niveles de oxígeno dentro del biorreactor, se adecuará una entrada a través de la tapa para cargar nitrógeno y mantener la concentración de oxígeno de acuerdo a las necesidades del proceso.

5.4.4.3 Sistemas de descarga. Durante el proceso de fermentación se genera CO_2 y H_2 , gases que tienen que ser eliminados del biorreactor. Teniendo en cuenta esta situación se adaptará un airlock (trampa de gases) en la tapa para que los gases salgan del sistema e impedir cualquier ingreso de oxígeno al mismo.

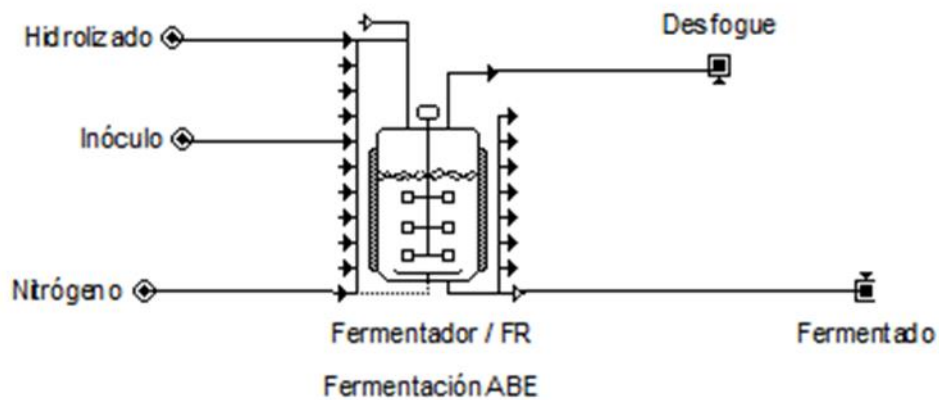
5.5 Evaluación teórica del proceso

La evaluación teórica del proceso se realiza mediante la simulación del fermentador en el software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer. Para ello, se utilizó un sistema batch, seleccionando como equipo de operación un fermentador, con 2 corrientes de salida, como lo son el desfogue y el fermentado, y 3 corrientes de entrada, que corresponden al hidrolizado, el inóculo y el nitrógeno que se usó como ajustador del oxígeno en el tanque. La simulación inicia con el registro de los diferentes componentes que intervienen en todo el proceso, los cuales se resumen en la figura 15. El montaje realizado se observa en la figura 16.

Figura 15. Registro de componentes



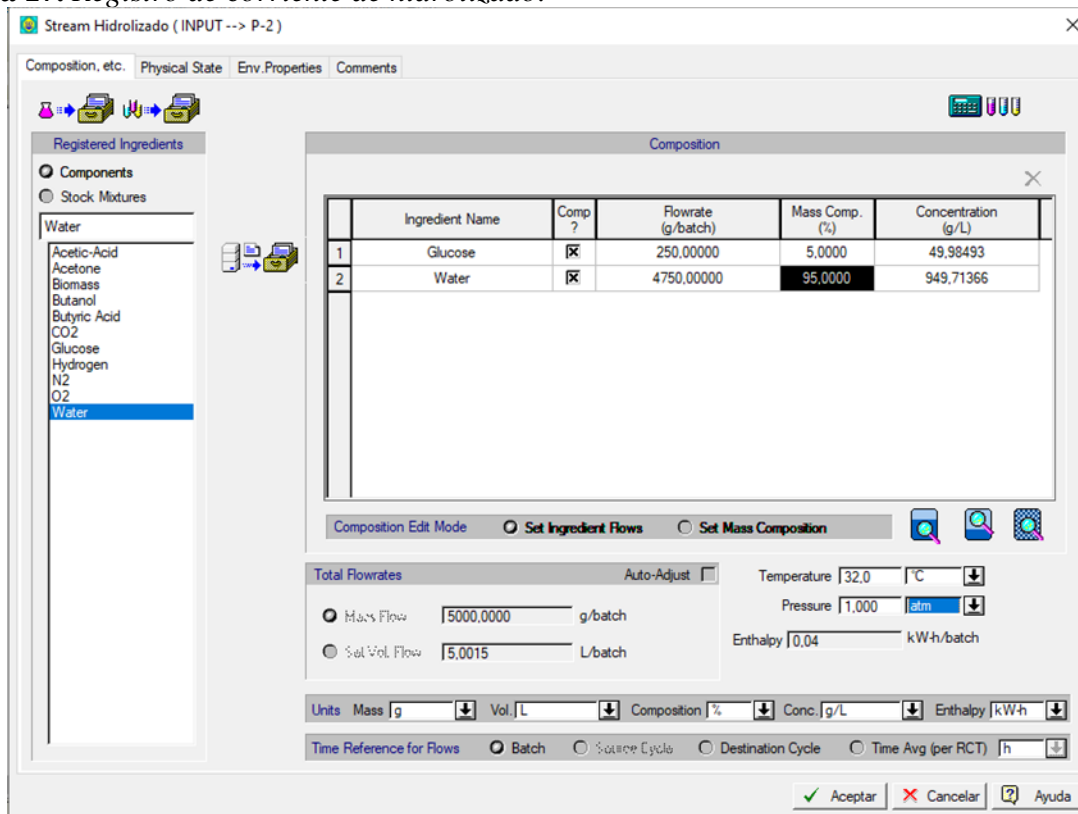
Tomado del software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

Figura 16. Fermentación ABE en el Software SuperPro Designer

Tomado del software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

5.5.1 Corriente de hidrolizado

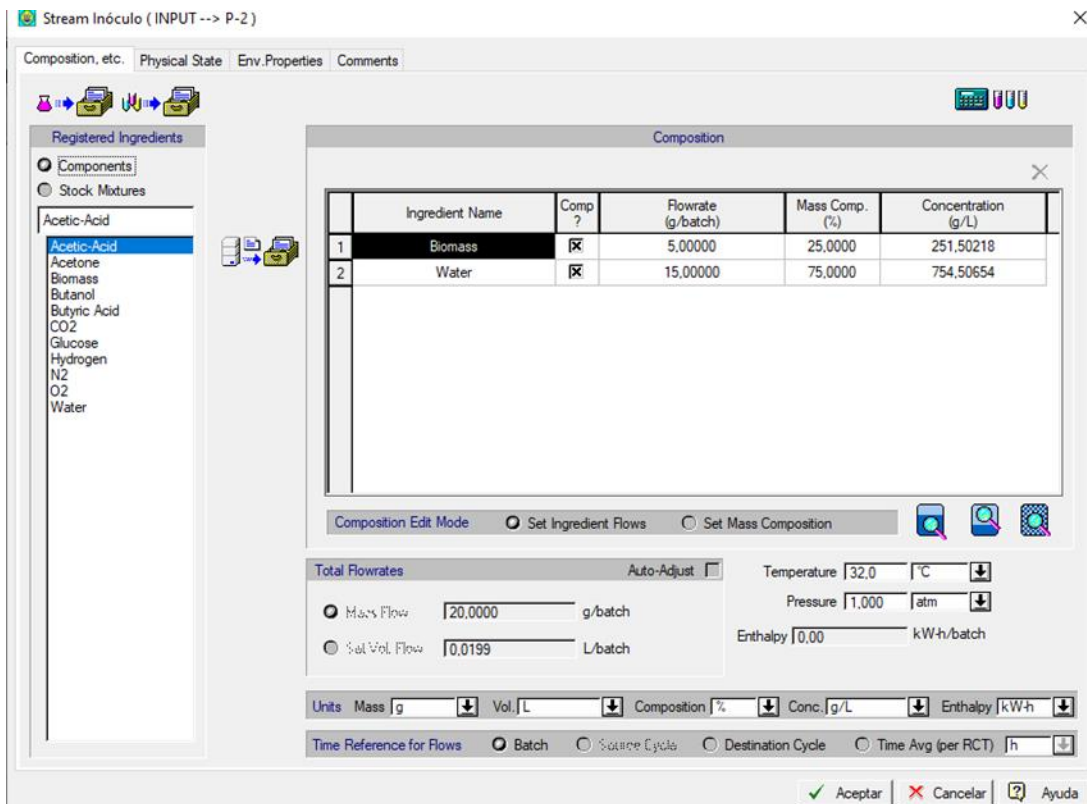
Es la alimentación del sustrato al sistema proveniente de la concentración de los hidrolizados del bagazo de caña de azúcar y raquis de palma africana. Esta corriente consta de un flujo de 5 litros de una mezcla de glucosa y agua, con una concentración de 50g/l (figura 17). La temperatura de la corriente se definió en 32°C a una presión atmosférica.

Figura 17. Registro de corriente de hidrolizado.

Tomado del software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

5.5.2 Corriente de inóculo

Es la corriente que introducirá al sistema la cepa de *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 previamente activada. De esta manera se cargó al proceso 5 gramos de cepa (Biomasa), disueltos en 15 ml de agua. La temperatura de la corriente se definió en 32°C a una presión atmosférica (figura 18).

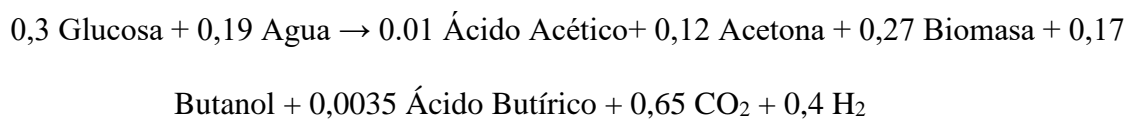
Figura 18. Registro de corriente de inóculo

Tomado del software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

5.5.3 Fermentación

La simulación de la fermentación se llevó a cabo siguiendo la estequiometría de la reacción reportada por Franciso Vela (Vela, 2008) tomando como temperatura y presión de operación 32°C y una atmósfera respectivamente. En la figura 19 se presenta el balance másico y molar de la reacción que se cargó en el fermentador estequiométrico del software SuperPro Designer.

Siguiendo estos parámetros se obtuvo la siguiente ecuación estequiométrica molar:



Eq 22

Figura 19. Registro del balance másico y molar de la reacción

Reactants					Products				
	Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.		Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.
1	Glucose	0,2950	180,157	53,1500	1	Acetic-Acid	0,0107	60,053	0,6400
2	Water	0,1904	18,015	3,4300	2	Acetone	0,1150	58,080	6,6800
					3	Biomass	0,2712	24,630	6,6800
					4	Butanol	0,1724	74,123	12,7800
					5	Butyric Acid	0,0035	88,106	0,3100
					6	CO2	0,6519	44,010	28,6900
					7	Hydrogen	0,3968	2,016	0,8000

Total Mass: 56,5800

Stoichiometric Coefficients: Mass Molar

Buttons: OK, Cancel, Help

Tomado del software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

Una vez llevada a cabo la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados en la corriente de fermentados:

Tabla 14. Composiciones de las corrientes de fermentados

Componente	Tasa de flujo (gramos)	Composición másica (%)	Concentración (gramos/litro)
Ácido acético	3,010	0,062	0,611
Acetona	31,421	0,644	6,376
Biomasa	36,421	0,746	7,391
Butanol	60,113	1,232	12,199
Ácido butírico	1,458	0,030	0,296
Agua	4748,866	97,287	963,687

Tomado de la simulación en el software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

Teniendo en cuenta la tabla 14, se puede determinar la efectividad de la cepa *Clostridium Saccharoperbutylacetonicum* N1-4 para producir Butanol, logrando una concentración de poco más de 12 g/L en la corriente de productos fermentados. Este resultado es consistente con el obtenido por Javier Bravo en su estudio titulado "Optimización de la producción de biobutanol

mediante fermentación ABE utilizando bagazo de manzana como sustrato" (Bravo, 2021), en el cual se estimó una producción máxima de butanol de 12,6 g/L. En otro estudio, los autores exploraron los efectos de combinar diversos tipos de biomasa lignocelulósica e integraron la pervaporación con la fermentación ABE. Esta integración facilitó la eliminación eficiente del butanol, mitigando la inhibición causada por el producto, y logrando una concentración final de biobutanol de 14,51 g/L (Chen et al., 2024).

Adicionalmente, se evidencia que el agua es el componente principal en la corriente de fermentados, lo que implica elegir un método de separación eficiente y económico que garantice la rentabilidad del proceso. Actualmente, la destilación sigue siendo la tecnología dominante en la recuperación de biocombustibles, aunque métodos con tecnología de membranas como la pervaporación están cobrando interés en la recuperación de Biobutanol (Vane, 2006).

5.5.4 Balance energético

Una vez finalizada la simulación se extrajeron los reportes de las corrientes asociadas al proceso de fermentación ABE, dentro de los cuales se evidencia la entalpía específica de cada una de las corrientes las cuales se reportan en la tabla 15.

Tabla 15. Masas y entalpías de las corrientes

Nombre de la corriente	Masa de la corriente (Kg)	Entalpía específica (Kcal/Kg)
Hidrolizado	5,00	31,26
Inóculo	0,02	26,95
Nitrógeno	4,46	7,97
Desfogue	4,60	8
Fermentado	4,88	24,77

Tomado y adaptado de la simulación en el software de procesos químicos de ingeniería SuperPro Designer

Adicionalmente, se realizó un balance energético para determinar el calor generado por la fermentación ABE utilizando la ecuación 23, donde una vez realizados los cálculos respectivos se determinó que se generan 145,49 KJ por cada Bach de operación.

$$\begin{aligned}
 & m_{hidrolizado} * h_{hidrolizado} + m_{inóculo} * h_{inóculo} + m_{nitrógeno} * h_{nitrógeno} \\
 & = Q_{gen} + m_{desfogue} * h_{desfogue} + m_{fermentado} * h_{fermentado} \\
 & 5kg * \frac{31,26kcal}{kg} + 0,02kg * \frac{26,95kcal}{kg} + 4,46kg * \frac{7,97kcal}{kg} \\
 & = Q_{gen} + 4,6kg * \frac{8kcal}{kg} + 4,88kg * \frac{24,77kcal}{kg} \\
 & Q_{gen} = 34,75kcal = 145,49 KJ
 \end{aligned}$$

Eq 23

6 Conclusiones

Tras analizar la vigilancia tecnológica y la capacidad de producción de biocombustibles valiosos, se concluyó que el butanol tiene un gran potencial como bioproducto en la transición energética, con el propósito de reducir el impacto ambiental de los combustibles fósiles. Sin embargo, se requiere de una mayor intercomunicación en la comunidad científica con el objetivo de fortalecer la viabilidad de este biocombustible.

Se identificó que la cepa *Clostridium Saccharoperbutylaceticum* N1-4 presenta el mejor potencial para la producción de Butanol teniendo en cuenta su productividad, conversión de glucosa, tolerancia a los solventes y además de que al no producir etanol disminuye notablemente los gastos de separación de los subproductos valiosos. Sin embargo, existen cepas modificadas genéticamente que presentan buena productividad y mejoras en la tolerancia al butanol.

Por medio de la simulación se obtuvo una concentración de biobutanol de 12 g/L, un valor que se encuentra dentro del rango reportado por otros autores. Adicionalmente, se obtuvo una concentración ABE superior a 19 g/L, para una concentración inicial de Glucosa de 50g/L, lo que representa una conversión del 38% del sustrato en productos con alto interés económico.

7 Recomendaciones

Realizar estudios financieros asociados al proceso, teniendo en cuenta que se producen subproductos valiosos, lo que podría generar rentabilidad en su producción a nivel industrial.

Diseñar una planta piloto en flujo continuo, tal como lo recomienda la literatura, para disminuir costos de operación y aumentar la eficiencia del proceso al disminuir la inhibición de fermentación por solventes.

Determinar la tolerancia de sustrato óptima (concentración de glucosa) para *Clostridium Saccharoperbutylacetonicum* N1-4 con el objetivo de tener una mayor conversión de productos valiosos sin la inhibición por sustrato.

Se recomienda emplear una metodología con variación en las combinaciones de múltiples biomazas, con la finalidad de explorar el potencial de producción de butanol optimizando su reactividad y eficiencia, teniendo en cuenta la disponibilidad de materia prima, rentabilidad y ventajas en la gestión de residuos.

Referencias

- Acosta, C. A. P. (2014). Crisis en ciencia y tecnología en Colombia. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 43(3), e5. <https://doi.org/10.1016/j.rcp.2014.07.005>
- Alcívar Bravo, A. A., Velásquez Bazurto, S. D., Baquerizo Crespo, R. J., & Riera, M. A. (2022). Diseño de una biorrefinería para la obtención de bioproductos a partir de residuos lignocelulósicos. *Técnica de La Facultad de Ingeniería*, 45, 172–184. <https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a04>
- Alvarado Ludeña, G. R. (2021). *Obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante hidrólisis enzimática*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Arianny, G., & Ollarves, T. (2014). “*Combustibles ambientalmente sostenibles: Caracterización termofísica de biogasolinas y biodieseles formulados a partir de biobutanol*.” Universidad de Valladolid.
- Baeyens, J., Kang, Q., Appels, L., Dewil, R., Lv, Y., & Tan, T. (2015). Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, 47, 60–88. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2014.10.003>
- Barragán T, A., Castillo S, L., Mojica L, A., & Montagut, L. (2013). *Planeamiento Estratégico para el Sector de Biocombustibles en Colombia*. Pontificia Universidad Católica del Perú .
- Bedoya, A., Castrillón, J. C., Ramírez, J. E., Vásquez, J. E., & Arias Zabala, M. (2008). Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte. *UN Dyna*, 75, 137–157.

- Bravo Venegas, J. (2021). *Optimización de la producción de biobutanol mediante fermentación ABE utilizando bagazo de manzana como sustrato*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Broda, M., Yelle, D. J., & Serwanska, K. (2022). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass — Challenges and Solutions. *Molecules*, 1–27.
- Cadena Martínez, D. L., & Cordoba España, W. A. (2022). *Propuesta para la obtención de biohidrógeno por fermentación oscura a partir de un residuo agroindustrial*. 8.5.2017, 2003–2005.
- Capítulo 2. Producción de etanol y sus coproductos. Procesos de molienda en seco y húmeda*. (2019).
- Casallas Ariza, J. N., & Giraldo Pinzón, D. F. (2020). *Rediseño del sistema del biodigestor tubular anaerobio porcino de la institución educativa agrícola de Guacavía, Cumaral-Meta*. [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/32009/2020juanariza.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- Chandekar, B., M.V., R., & Patel, S. K. S. (2024). Efficient dark-fermentation biohydrogen production by *Shigella flexneri* SPD1 from biowaste-derived sugars through green solvents approach. *Bioresource Technology*, 410, 131276. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.131276>
- Chandler, C., Villalobos, N., González, E., Arenas, E., Mármol, Z., Ríos, J., & Aiello Mazzarri, C. (2012). Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables. *MULTICIENCIAS*, 12, 245–253.

- Chen, X., Li, Y., Li, X., Shi, J., & Liu, L. (2024). Exploring the potential of multiple lignocellulosic biomass as a feedstock for biobutanol production. *Fuel*, 357, 129697. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129697>
- Conpes 4075 Política de Transición Energética (2022). https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/CONPES_4075_DE_2022.pdf
- Constitución Política de Colombia (1991).
- Corea Vega, G. E., & Morales García, P. D. (2019). *Análisis del proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, por hidrólisis ácida diluida, fermentación separada, UNAN-Managua 2019*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
- Decreto 2811 de 1974 (1974). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>
- Del Río Calle, M. A. (2018). *Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar con el fin de generar nuevos usos* [Instituto Tecnológico Metropolitano. ITM]. https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/5666/MariaAlejandra_DelRioCalle_2018.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Díaz Betancourth, D. P. (2007). *Hidrólisis enzimática de la tusa de la palma de aceite (Elaeis Guineensis JACQ) pretratada con ácido sulfúrico diluido para la producción de azúcares fermentables*. Universidad de los Andes.
- Doménech Martínez, P. (2020). *Tecnologías de producción de hidrógeno basadas en métodos biológicos*.

- Duda, R. M., da Silva Vantini, J., Martins, L. S., de Mello Varani, A., Lemos, M. V. F., Ferro, M. I. T., & de Oliveira, R. A. (2015). A balanced microbiota efficiently produces methane in a novel high-rate horizontal anaerobic reactor for the treatment of swine wastewater. *Bioresource Technology*, *197*, 152–160. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.08.004>
- Dzięgielewski, W., Gawron, B., Kaźmierczak, U., & Kulczycki, A. (2014). BUTANOL/BIOBUTANOL AS A COMPONENT OF AN AVIATION AND DIESEL FUEL. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, *21*(2), 69–75. <https://doi.org/10.5604/12314005.1133869>
- Factorenergía. (2016, December 13). *Energías alternativas: Qué son y qué tipos existen*. <https://blog.primagas.es/energias-alternativas-que-son>
- Fedepalma. (2023). *Fedepalma*. <https://web.fedepalma.org/node/923>
- Forero Reyes, A. V. (2015). *Problemática en torno al uso de fuentes de energía convencionales en la ciudad de Bogotá: alternativas y desafíos*.
- García, E. L. (2017). Diseño de un reactor biológico para la producción de biobutanol. In *Proyectos de fin de carrera de Ingeniería Química*.
- García Mariaca, A., Cendales Ladino, E. D., & Eslava Sarmiento, A. F. (2016). Motores de combustión interna (MCI) operando con mezclas de etanol gasolina: revisión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *26*(1), 75. <https://doi.org/10.18359/rcin.1626>
- García Romero, H., & Laura Calderón, E. (2012). *Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia*. FEDESARROLLO.
- Garrido Romero, M. (2020). Biocombustibles y producción de biohidrógeno. *Moleqla*, *38*.

- Gautam, P., Neha, Upadhyay, S. N., & Dubey, S. K. (2020). Bio-methanol as a renewable fuel from waste biomass: Current trends and future perspective. *Fuel*, 273(April), 117783. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117783>
- Gaviria González, N. (2022, January 26). *Más de 92% de la palma de aceite en Colombia se siembra en terrenos de uso previo*. Agronegocios. <https://www.agronegocios.co/agricultura/mas-de-92-de-la-palma-de-aceite-en-colombia-se-siembra-en-terrenos-de-uso-previo-3291687>
- Gómez da Silva, M., Gálvez Cantero, L., Gómez Julián, A. M., Julián Ricardo, M. C., & Ramos Sánchez, L. B. (2022). Análisis de alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. *Centro Azúcar*, 49, 15–25.
- Grisales-Díaz, V. H. (2020). Review of advanced process technologies for butanol production: an alternative biofuel. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, 8(3), 172–182. <https://doi.org/10.15649/2346030X.639>
- Hawrot-paw, M., & Stanczuk, A. (2023). *From Waste Biomass to Cellulosic Ethanol by Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF) with Trichoderma viride*. 1–10.
- Hussain, A., Liao, H., Ahmad, K., Ahsan, M., Hussain, M. I., Waheed Iqbal, M., Aqeel, S. M., Hussain, A., & Xia, X. (2022). Bacterial metabolic engineering for the production of second-generation (2 G) bioethanol and biobutanol; a review. *Journal of Applied Microbiology*, 134, 1–11. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxac061>
- ICA. (2018, August 15). *Productores agrícolas de Santander se fortalecen en el cultivo de la caña panelera*. <https://www.ica.gov.co/noticias/fertilizacion-nutricion-cana-panelera-santander>

- Infante Castilla, C. (2016). *Evaluación tecno-económica de la producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha*.
- Jaramillo Sierra, P. V. (2022). *Aprovechamiento energético de la cáscara de piña como biomasa para la obtención de bioetanol y bromelina como subproducto con ayuda del simulador Aspen Plus* [Universidad Autónoma de Bucaramanga]. https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/18473/2022_Tesis_Jaramillo_Sierra_Paula.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jiang, W., Zhao, J., Wang, Z., & Yang, S. T. (2014). Stable high-titer n-butanol production from sucrose and sugarcane juice by *Clostridium acetobutylicum* JB200 in repeated batch fermentations. *Bioresource Technology*, *163*, 172–179. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.04.047>
- Jiménez Fonseca, A. L. (2018). *Proceso de producción de bioetanol, a partir de la biomasa hidrolizada de la eichhornia crassipes con la levadura (saccharomyces cerevisiae)* [Fundación Universitaria los libertadores]. [http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_umsetzungsempfehlungen.pdf%0Ahttps://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/9744_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf%0Ahttps://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-PIs/2018/180607 -Bitkom](http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_umsetzungsempfehlungen.pdf%0Ahttps://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/9744_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf%0Ahttps://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-PIs/2018/180607-Bitkom)
- Jirón García, E. G., Rodríguez Mora, K., & Bernal Samaniego, C. (2022). Obtención de nanocelulosa a partir de raquis de palma africana y bagazo de caña. *Tecnología En Marcha*, *35*(2), 167–181. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/5609/5917

- Kafarov, V., Ojeda, K., & Sánchez, E. (2006). Situación y perspectiva de biocombustibles en Colombia. *Encontro de Energia No Meio Rural*.
- Lam, M. K., & Lee, K. T. (2011). Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, 673–690. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008>
- Ley 693 de 2001 (2001).
- Ley 939 de 2004 (2004).
- Ley General Ambiental de Colombia. Ley 99 de 1993 (1993). https://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia_99-93.pdf
- Lima Toapanta, B. P. (2019). Evaluación de la fermentación de Chonta (*Bactris gasipaes*) empleando microorganismo fermentadores del Kéfir y levadura para la obtención de una bebida fermentada [Universidad Técnica de Cotopaxi]. In *Universidad técnica de cotopaxi* (Vol. 1). <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>
- Lin, Z., Cong, W., & Zhang, J. (2023). Biobutanol Production from Acetone–Butanol–Ethanol Fermentation: Developments and Prospects. In *Fermentation* (Vol. 9, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/fermentation9090847>
- Llenque Díaz, L. A., Quintana Díaz, A., Torres Lino, L., & Segura Vega, R. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales. *Rebiol*, 40(1), 21–29. <https://doi.org/10.17268/rebiol.2020.40.01.03>
- Macias Mendoza, A., Pérez, J., & Torres, J. (2022). Pasado , presente y perspectiva del Bioetanol en Ecuador. *Revista Ciencia UNEMI*, 15(1390–4272), 38–51.

- Martínez, J. A., Montoya, N., & Sierra, M. (2014). Energía del futuro: Bioalcoholes a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). *Rev. Esc.Adm.Neg [Online]*, 77, 64–81.
- Mejía Almeida, M. E. (2012). *Elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos a partir de fibra de raquis de palma africana (Elaeis guineensis Jacq.)*. Escuela Politécnica Nacional.
- MinEducación. (2005). *Educación para el desarrollo sostenible*.
<https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-90893.html>
- Minenergía. (2011). *Manual de biogás*.
- Ministerio de Energía. (2019). Plan Energetico Nacional 2020-2030. *Handbook of Pediatric Retinal OCT and the Eye-Brain Connection*, 86.
- MME -ministerio de Minas y Energía. (2018). *Resolucion 40184 de 27 de Febrero de 2018*.
<http://www.fedebiocombustibles.com/files/40184.pdf>
- Navarro Gallón, S. (2022, March 5). *Un problema grave de Colombia es la dependencia de las importaciones de tecnología*. <https://mascolombia.com/un-problema-grave-de-colombia-es-la-dependencia-de-las-importaciones-de-tecnologia/>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Noriega Medrano, L. J. (2017). *Producción de butanol por Clostridium acetobutylicum en cultivo semicontinuo*.
- Nuntón Núñez, S. H. de los A. (2018). Influencia de la temperatura y pH en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un digestor Batch [Universidad Nacional “Pedro Ruíz Gallo”]. In *Facultad de Ingeniería*

química e industrias alimentarias.

<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3611>

Pan, S., Zabed, H. M., Wei, Y., & Qi, X. (2022). Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops and Products*, 188(PB), 115684. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>

Paniagua García, A. I. (2020). Degradación de material lignocelulósico. Evaluación de pretratamientos químicos e hidrólisis enzimáticas para la obtención de alcoholes por fermentación. In *Dialnet* (Vol. 3). Universidad de León.

Pérez Molano, O. L. (2021, October 5). *La tecnología en la agroindustria colombiana*. <https://www.upb.edu.co/es/central-blogs/sostenibilidad/tecnologia-agroindustria-colombiana>

Perry, R. H., & Green, D. W. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* (Cuarta, Vol. 2). McGraw Hill.

Piñeros Castro, Y. (2014). *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia* (Primera).

Qureshi, N., & Blaschek, H. P. (2001). Recovery of butanol from fermentation broth by gas stripping. *Renewable Energy*, 22(4), 557–564. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00108-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00108-7)

Qureshi, N., Saha, B. C., Liu, S., Ezeji, T. C., & Nichols, N. N. (2021). Cellulosic butanol biorefinery: Production of biobutanol from high solid loadings of sweet sorghum bagasse—simultaneous saccharification, fermentation, and product recovery. *Fermentation*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/fermentation7040310>

- Rivera, E. C., Assumpção, D. C., Kwon, H. J., Okonkwo, C. C., Ezeji, T. C., Filho, R. M., & Mariano, A. P. (2023). Mechanistic modeling of redox balance effects on the fermentation of eucalyptus wood-derived xylose to acetone-butanol-ethanol. *Biochemical Engineering Journal*, *190*, 108738. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2022.108738>
- Rodríguez Rojas, M. C., Morales Rodríguez, R., & Rodríguez Gomez, D. (2016). Producción de ácido láctico a partir de bagazo de caña residual de la industria azucarera. *Jóvenes En La Ciencia*, *2*(1), 1594–1597.
- Ruíz Colorado, A., Quintana, J. C., Niño, J., Cano, N., Gómez, A. C., Daza, S., Sierra, A. F., & Correa, J. F. (2014). Biomasa lignocelulósica en Colombia, pretratamientos y productos de valor agregado. In *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia* (Primera). https://books.google.es/books?hl=es&lr=lang_es|lang_en&id=VgJ6EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=materiales+lignocelulosicos+para+biocombustibles+presentes+en+colombia&ots=Mw9Hwxbm0D&sig=FltqenJ1I3nK8GXpVDuTfqD4ZeE#v=onepage&q&f=false
- Tinoco Valencia, R., Serrano Carreón, L., Sierra Ibarra, E., Gosset Lagarda, G., Martínez Jiménez, A., Teymennet Ramírez, K. V., Trejo Hernández, M. R., Molina Vázquez, E. R., Escalante Lozada, A., Martínez Morales, F., Balderas, E., & Caspeta, L. (2021). Biorrefinerías y Sustentabilidad. In *Biotecnología en Movimiento*. www.biotecmov.org
- Vane, L. M. (2006). Erratum: A review of pervaporation for product recovery from biomass fermentation processes (*Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (2005))

vol. 80 (603-629)). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81(7), 1328.

<https://doi.org/10.1002/jctb.1345>

Vela Aragón, F. J. (2008). *Diseño de una planta piloto para la obtención de biobutanol a partir de azúcar bruta*. Universidad de Cádiz.

Ventrua Ibañez, E. A. (2020). Obtención experimental de biotanol a partir de material lignocelulósico de residuos del maíz amarillo (Marlo u olote). In *Repositorio UAJMS*.

<https://dicyt.uajms.edu.bo/investigacion/index.php/quimica/article/view/174>

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940.

<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.02.044>

Zhang, Y., Yujiu, ., Fangxiao, M. ., & Chunhui Zhang, Y. . (2009). Continuous acetone-butanol-ethanol production by corn stalk immobilized cells. *J Ind Microbiol*

Biotechnol, 36, 1117–1121. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0582-3>