

Tecnología utilizada para la obtención de etanol a partir del almidón como biomasa residual de papa (*Solanum tuberosum*) y maíz (*Zea mays*)

Diana Esperanza Benavides Palacios

Asesor

Mery Liliana López Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería de Alimentos

2024

Dedicatoria

A Dios por ayudarme a dar el paso en cada escalón, logrando con persistencia y constancia lo que para otros puede ser inalcanzable. Gracias por permitirme vivir y compartir con personas realmente valiosas, por ser aquella fuerza de reserva cuando la mía está agotada, gracias por todas las bendiciones recibidas cada día.

A mis hijos Emmanuel, Mar Dalila y mi bebé que está por nacer que son el motor impulsor para salir a delante, ustedes que son la luz de mi vida, de mis ganas de ser mejor persona, mi razón de ser y de mi preparación, deseo transmitirles mi educación, esfuerzo y dedicación.

A mis padres Esperanza Palacios y Armando Benavides, por su apoyo incondicional, consejos, comprensión, amor y ayuda continua, en especial en los momentos más difíciles. Gracias porque ustedes han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mi carácter y perseverancia para lograr lo propuesto.

“Saber no es suficiente, tenemos que aplicarlo. Tener la voluntad no es suficiente tenemos que implementarla”.

Diana Esperanza Benavides Palacios

Resumen

Este trabajo se realizó como opción de grado del programa de Ingeniería de Alimentos, en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Su contenido es el producto de una exhaustiva investigación de publicaciones de artículos científicos, de monografías que se encuentran en el repositorio Institucional de la UNAD, y de la bibliografía existente en bases de datos, artículos científicos en internet y diferentes estudios llevados a cabo por investigadores de varias entidades como institutos científicos y laboratorios en donde se presenta las diferentes aplicaciones y tecnologías utilizadas para la obtención de etanol a partir del almidón como biomasa residual de papa (*Solanum tuberosum*) y Maíz (*Zea mays*).

Un aspecto importante a tener en cuenta en el desarrollo del país es el mejoramiento de la eficiencia en los procesos de generación de energía, optimización del consumo de combustibles en todos los sectores que garanticen el uso racional de energía según la Ley 697 de 2001 (Ley URE), mediante la cual se promueve la utilización de energías alternativas como los biocombustibles a partir de residuos agroindustriales, es por ello que en este trabajo se estudió como tecnología utilizada para la obtención de etanol la hidrólisis del almidón, seguido de la espectrofotometría, fermentación, obtención de etanol, aplicación del etanol, destilación y finalmente la cromatografía para medición de etanol producido. Teniendo en cuenta que las materias primas estudiadas papa y maíz muestran un buen potencial productivo, estos representan un buen estímulo para los productores de las mismas, especialmente enfocados en la agregación de valor, ya que tendría un aporte importante en la economía regional, en el ambiente y la sustentabilidad del sistema productivo.

Palabras claves: papa, maíz, almidón, fermentación, etanol.

Abstract

This work was carried out as a degree option of the Food Engineering program, at the National Open and Distance University UNAD. Its content is the product of an exhaustive investigation of publications of scientific articles, monographs found in the UNAD Institutional repository, and the existing bibliography in databases, scientific articles on the Internet and different studies carried out by researchers from various entities such as scientific institutes and laboratories where the different applications and technologies used to obtain ethanol from starch as residual biomass of potato (*Solanum tuberosum*) and corn (*Zea mays*) are presented.

An important aspect to take into account in the development of the country is the improvement of efficiency in energy generation processes, optimization of fuel consumption in all sectors that guarantee the rational use of energy according to Law 697 of 2001 (Law URE), through which the use of alternative energies such as biofuels from agroindustrial waste is promoted, which is why in this work the hydrolysis of starch was studied as a technology used to obtain ethanol, followed by spectrophotometry, fermentation, obtaining ethanol, application of ethanol, distillation and finally chromatography to measure the ethanol produced. Taking into account that the raw materials studied potato and corn show good productive potential, these represent a good stimulus for their producers, especially focused on value addition, since it would have an important contribution to the regional economy, in the environment and the sustainability of the productive system.

Keywords: potato, corn, starch, fermentation, ethanol.

Tabla de Contenido

Introducción	10
Planteamiento del Problema	12
Justificación	13
Objetivos	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
Marco Teórico	15
Biomasa Residual	15
Almidón	15
Propiedades del Almidón	16
Estructura y Composición	17
Amilosa	17
Amilopectina	18
Hidrólisis	19
Espectrofotometría	19
Fermentación	20
Etanol	20
Gasolina Oxigenada	20
Gasohol	20
Biocombustible	21
Destilación	22
Cromatografía	22

Desarrollo de la Temática	23
Estado Actual de la Producción de Etanol	23
Estado Actual Latinoamérica.....	23
Tecnología Empleada para la Obtención de Etanol	28
Extracción del Almidón.....	28
Hidrólisis Química	30
Hidrólisis Enzimática	30
Espectrofotometría	31
Método de Ácido 3,5 Dinitrosalicílico.....	31
Fermentación	32
Condiciones que Deben Medirse y Controlarse en una Fermentación Discontinua	33
Temperatura.....	34
Brix.....	34
pH.....	35
Aireación.....	35
Levaduras.....	36
Requerimientos Nutricionales de las Levaduras.....	37
Crecimiento de Biomasa.....	37
Etanol.....	37
Aplicación del Etanol.....	39
Destilación.....	39
Cromatografía.....	40
Novedosas Fuentes de Productos Agrícolas Para la Obtención de Biocombustible	41

Papa	43
Maíz.....	47
Remolacha	49
Cáscara de Plátano.....	50
Caña de Azúcar.....	50
Yuca	51
Conclusiones	53
Recomendaciones	55
Referencias Bibliográficas	56

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Productores de Alcohol Carburante</i>	27
Tabla 2 <i>Almidón Presente en Diferentes Alimentos</i>	43
Tabla 3 <i>Almacenamiento (ton) de Papa en el Departamento de Nariño</i>	45
Tabla 4 <i>Producción de Maíz Amarillo y Maíz Blanco (ton)</i>	48

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Estructura Morfológica del Almidón de Papa.</i>	15
Figura 2 <i>Micrografías del Almidón de Maíz</i>	16
Figura 3 <i>Estructura de la Amilosa</i>	18
Figura 4 <i>Estructura de la Amilopectina</i>	18
Figura 5 <i>Evolución de la Producción de Biocombustibles</i>	24
Figura 6 <i>Producción Anual de Bioetanol en Colombia (en m3)</i>	25
Figura 7 <i>Importaciones Anuales de Bioetanol en Colombia (en m3)</i>	26
Figura 8 <i>Conversión de los azúcares reductores mediante DNS</i>	32
Figura 9 <i>Esquema de Distintas Formas de Levadura</i>	36
Figura 10 <i>Aplicación del Etanol</i>	39
Figura 11 <i>Diagrama de Flujo</i>	41

Introducción

El aumento de los precios de los combustibles fósiles, las estrictas regulaciones gubernamentales sobre las emisiones de escape y el agotamiento futuro de las reservas de petróleo impulsaron la racionalización del uso de la energía, hacer un uso más eficiente de ella, y de la diversificación de las fuentes y suministros de éstas se ha convertido cada vez en una actividad de gran importancia (Monsalve. J *et al.*, 2006; Chandel. K *et al.*, 2007) llevando en todo el mundo una búsqueda incesante de formas de aprovechamiento de estas energías que sean factibles técnicamente y atractivas económicamente (Renovables, M, 2017; Betancur, M. y Gomez, C. 2011; Vazirzadeh, M. y Robati, R. 2013; Hashem, M. y Darwish, I. 2010; Santos, M., 2018). Los alcoholes (etanol y metanol) se han considerado como los combustibles alternativos para motores diésel. Actualmente, la producción comercial de etanol se basa en la fermentación de la sacarosa de la caña de azúcar y melaza o la glucosa derivada de los cultivos que poseen como principal componente el almidón, tales como maíz, trigo y yuca. Hay una necesidad creciente para la industria de mejorar la tecnología y aumentar la producción (Hashem, M. y Darwish, I. 2010; Renovables, M, 2017; Cerón, V. *et al.*, 2011; Khan, R. *et al.*, 2012).

Sobre las dificultades en la producción de bioetanol Cerdá, E. (2012) y Esteban, L. y Carrasco, J. (2011) dicen: se presenta competitividad con los alimentos en la tierra por lo tanto hay menor disponibilidad de biomasa, (Castro, C. *et al.*, 2011) proponen el uso de los desperdicios agroindustriales y agrícolas para la obtención de materia prima que permita la obtención de etanol como combustible (Sosa, W. *et al.*, 2016).

Con la sociedad sensibilizada ante los peligros del cambio climático, la búsqueda de un combustible que sustituya al petróleo y que, de paso, ayude a reducir las emisiones de dióxido de

carbono a la atmósfera se ha convertido en un desafío para las grandes industrias (Castro, C. *et al.*, 2011).

Un aspecto importante a tener en cuenta en el desarrollo del país es el mejoramiento de la eficiencia en los procesos de generación de energía, optimización del consumo de combustibles en todos los sectores que garanticen el uso racional de energía según la Ley 697 de 2001 (Ley URE), mediante la cual se promueve la utilización de energías alternativas, como los biocombustibles a partir de residuos agroindustriales. Entre estos se encuentra la papa y la yuca, consideradas como un cultivo de gran potencial para la producción de etanol, actualmente los residuos de cosecha han sido destinados como alimento para animales (Izmirliglu y Demirci, 2012).

Al obtener bioetanol a partir de papa (*Solanum tuberosum*) y del Maíz (*Zea mays*) se da un uso más rentable a éstos tubérculos, contribuyendo en la reducción del impacto ambiental por causa de acumulación de residuos. En el desarrollo de esta monografía se identifica la tecnología utilizada en la obtención de etanol a partir del almidón como biomasa residual de papa y maíz. Partiendo de la hidrólisis, ésta permite romper las moléculas de almidón y obtener el azúcar fermentable, glucosa; existen dos alternativas para llevarla a cabo, vía enzimática o vía ácida, posterior a ello se realiza fermentación utilizando de manera general levadura de panadería comercial (*Saccharomyces cerevisiae*) debido a los costos y a su disponibilidad, y finalmente se investiga a cerca del método para determinar el rendimiento de etanol hidratado que se obtiene del proceso.

Planteamiento del Problema

El almidón es materia prima para la fabricación de numerosos productos donde destaca el etanol, por lo mismo puede proporcionar a nuestra economía una fuente de abastecimiento casi ilimitada en la elaboración de bioetanol (Odar, J. & Parraguez, D. 2019).

La eficiencia de la producción de etanol en gran medida depende de la disponibilidad de sustrato, la cepa de levadura y el método empleado. Son los principales parámetros evaluados en las investigaciones que permiten modelaje de los procesos y conseguir mejores resultados (Valdez, H., *et al.*, 2019).

La papa y el maíz residual no comercializados ha incrementado con la demanda mundial y se ha convertido en un problema de contaminación ambiental que no puede pasarse por alto, por ello es importante investigar para aprovechar estas biomásas y optimizar procesos para equilibrar la balanza energética y económica. Por ello el área seleccionada es el Desarrollo Agroindustrial y la investigación que mejor se ajusta a la problemática planteada es el de la monografía.

Es importante ahondar en el conocimiento y así aprovechar de la mejor manera estas biomásas residuales optimizando procesos para equilibrar la balanza energética y económica a favor del uso de la papa y el maíz. Así entonces se plantea la siguiente pregunta.

¿Cuál es la tecnología utilizada para obtener etanol a partir del almidón presente en la biomasa residual de papa y maíz?

Justificación

Actualmente, la producción comercial de etanol se basa en la fermentación de la sacarosa de la caña de azúcar o glucosa derivada de los cultivos a base de almidón, tales como maíz, trigo, yuca y papa (Smith, A. 2008), hay una necesidad creciente para la industria de mejorar la tecnología y aumentar la producción de etanol (Hashem, M. y Darwish, I. 2010).

Para Colombia es importante producir bioetanol por las siguientes razones: Disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera, con la mezcla de solo 10% de etanol con la gasolina, se disminuyen en 27% las emisiones de monóxido de carbono en carros nuevos, 45% en carros típicos colombianos de 7-8 años de uso y 20% de hidrocarburos a la atmósfera colombiana, con las positivas consecuencias para la salud humana y ambiental. Los cambios atmosféricos son evidentes (Kafarov, V. *et al.*, 2006).

Este estudio se hace necesario para identificar alternativas energéticas viables, con el fin de disminuir el consumo de los combustibles fósiles debido a la contaminación que estos generan y con el tiempo poder llegar a remplazarlos.

Objetivos

Objetivo General

Identificar la tecnología utilizada en la obtención de etanol a partir del almidón como biomasa residual de papa (*Solanum tuberosum*) y Maíz (*Zea mays*).

Objetivos Específicos

Describir mediante la consulta de referencias bibliográficas el estado actual de la producción de etanol.

Describir la tecnología empleada para el tratamiento y el aprovechamiento de la biomasa residual de papa y maíz en la obtención de etanol e identificar las variaciones del proceso.

Identificar las novedosas fuentes de productos agrícolas para la obtención de biocombustible líquido o biocarburante, con el fin de avanzar en el conocimiento de estas investigaciones.

Marco Teórico

A continuación, se definen conceptos necesarios para entender y dar inicio al desarrollo de la temática con el desglosamiento de los objetivos específicos:

Biomasa Residual

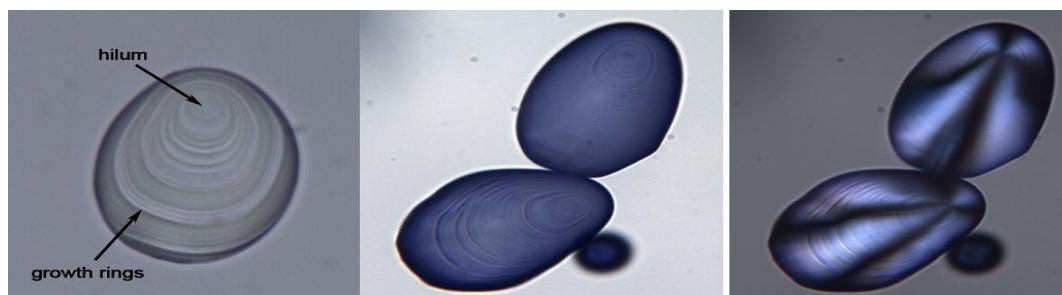
Es todo tipo de material orgánico generado en el desarrollo de alguna actividad, puede ser aprovechado o transformado en otros productos, reduciendo los impactos al medio ambiente y haciendo así una gestión sostenible de lo que a veces se desecha. (Martínez, P. 2014).

Almidón

El almidón es un polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, y proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual. Del mismo modo, la cantidad de almidón utilizado en la preparación de productos alimenticios, sin contar el que se encuentra presente en las harinas usadas para hacer pan y otros productos de panadería. En la figura 1 se ilustra la estructura morfológica de los granos de almidón (Murgas, T., y Vásquez, M., 2012).

Figura 1

Estructura Morfológica del Almidón de Papa.



Nota. Tomado de <http://archaeobotany.dept.shef.ac.uk/wiki/index.php/Image:PotatoIKI.jpg>

Propiedades del Almidón

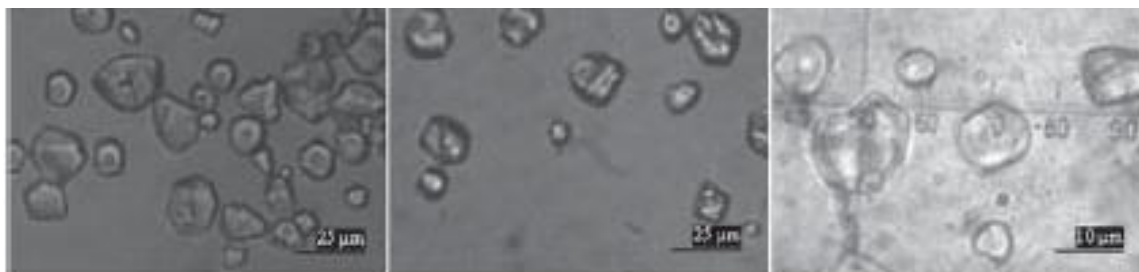
El almidón es un polvo blanco, amorfo, plástico, cuya densidad es 1,6 mg/mL, que a veces se caracteriza por un brillo peculiar. Es insoluble en agua, alcohol y éter. Al microscopio presenta características definidas, pudiéndose identificar fácilmente. Químicamente es oxígeno, nitrógeno y carbono. Su procedencia se distingue por el tamaño y la forma de los granos.

(Murgas, T., y Vásquez, M., 2012). En virtud de su forma se pueden dividir los almidones en 5 clases.

- Almidones de gránulos en forma de óvalos grandes formando anillos concéntricos y con el núcleo (hilum) colocado excéntricamente. Ejemplo: la papa (Figura 1).
- Almidones de gránulos ovoides usualmente formando anillos concéntricos, con núcleo irregular. Ejemplo: las leguminosas.
- Almidones de gránulos ovoides con núcleo central. Ejemplo: el maíz (Figura 2).
- Almidones de gránulos trancos en uno de los extremos. Grupo del sagú. Ej.: la yuca.
- Almidones cuyos gránulos forman ángulos pequeños y poligonales. Ej.: el arroz.

Figura 2

Micrografías del Almidón de Maíz



Nota. Tomado de Medina, J., & Salas, J., (2008).

Estructura y Composición

Se compone de dos polisacáridos: la amilosa molécula lineal, que consta de polímeros de glucosa predominantemente conectados por enlaces α 1-4 y amilopectina el componente macromolecular principal de almidón, responsable de la estructura de los gránulos. El almidón es un compuesto polisacárido que se encuentra en muchas plantas. De acuerdo a su origen, puede ser clasificado en cereales, legumbres, de palma y de tubérculo o raíz (Guerra-Rodriguez, E., *et al.*, 2012).

Todos los almidones tienen fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$. el factor n tiene por lo menos un valor igual a 4; llegándose a encontrar fórmulas con 100 a más átomos de carbono.

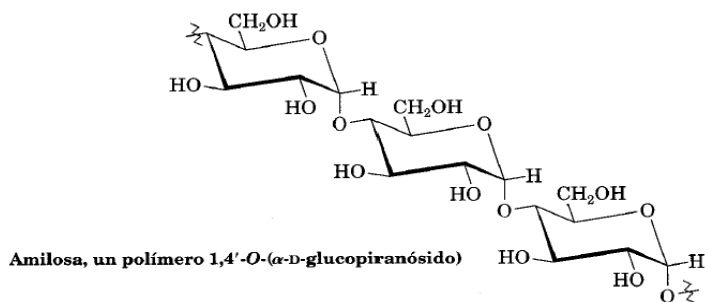
La diferencia entre la celulosa y el almidón radica en que, en el almidón, los restos de glucosa están unidos entre sí por uniones glucosídicas 1-4, con orientación α , mientras que la celulosa tiene uniones 1-4 glucosídicas con orientación β . Además de esto se sabe que el almidón contiene alrededor del 20% de una fracción soluble en agua llamado amilosa y el 80% de una solución insoluble conocida como amilopectina (McMurry, J., 1998).

Amilosa

La α - amilosa está constituida por cadenas largas no ramificadas en las que todas las unidades de D- glucosa se encuentran unidas mediante enlaces glucosídicos α (1,4); por lo tanto, la unidad que se repite es la maltosa. El peso molecular de la amilosa depende de su origen botánico, su aislamiento y el método utilizado. Entre los valores aceptados para la amilosa están entre 1,1 y 1,9 millones de Daltons.

Figura 3

Estructura de la Amilosa



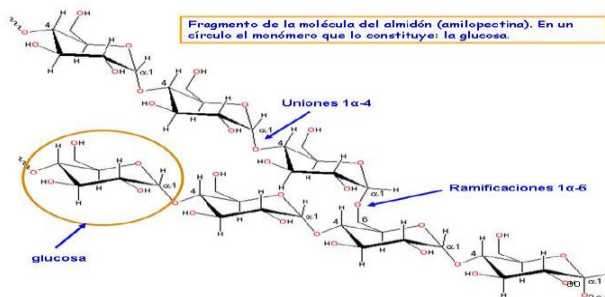
Nota. Tomado de McMurry, J., 1998.

Amilopectina

Presenta una cadena lineal de tipo α como en la amilosa; además tiene alrededor de 4-5% de las unidades de glucosa unidas por enlaces α (1,6) dando una estructura ramificada creciente. El peso molecular de la amilopectina es muy variable; las mejores valoraciones del peso molecular promedio son de 10 a más de 20 millones de Daltons (Morrison, R., y Boyd, 1996).

Figura 4

Estructura de la Amilopectina



Nota. Tomado de McMurry, J., 1998.

Hidrólisis

Es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química. Esta reacción es importante por el gran número de contextos en los que el agua actúa como disolvente. Este término también puede aplicarse a reacciones en donde un ácido se añade al agua, en mayor o menor cantidad para acelerar una reacción; esta hidrólisis puede llevarse a cabo con ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos o por acción enzimática, la cual es la más utilizada industrialmente (Chirinosa, R. *et al.*, 2017).

Espectrofotometría

La espectrofotometría es la medición de la cantidad de energía radiante, dentro del espectro UV-visible, que absorbe o transmite un sistema químico en función de la longitud de onda; es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones químicas y bioquímicas. El espectrofotómetro es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia (Pecsok, R., y Donal, L., 1983).

Dependiendo de la complejidad de una sustancia puede llegar a una infinidad de estados energéticos, las energías de las radiaciones electromagnéticas son cuantificadas. Por lo tanto, cada sustancia puede absorber ciertas radiaciones y otras no. La absorptividad es un factor que indica la capacidad de una sustancia para absorber una radiación determinada y junto con su curva espectral son parámetros utilizados como referencia para la identidad de un compuesto (Ospina, M., 2008).

Fermentación

La fermentación alcohólica es una reacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono. La conversión se representa mediante la ecuación 1 (Vázquez, H., y Dacosta, O., 2007).

Ecuación de fermentación.



Etanol

Los alcoholes son derivados de simples hidrocarburos (moléculas formadas por carbono e hidrógeno) y se caracterizan por tener un grupo oxidrilo (OH) unido a uno de los átomos de carbono. Al mezclarse con agua en cualquier proporción, da una mezcla azeotrópica. Su fórmula química es $CH_3 - CH_2 - OH$ y su fórmula molecular es C_2H_5OH . Es el más común de los alcoholes y se caracteriza por ser un compuesto líquido, incoloro volátil, inflamable, con un punto de ebullición de $78^\circ C$ y de menor toxicidad (Bacca, A., & Revelo, D., 2020).

Gasolina Oxigenada

Es una mezcla de Gasolina con un compuesto que contiene oxígeno en su molécula, que mejora la combustión en los motores. A nivel mundial se han venido utilizando compuestos tipo éter (MTBE, ETBE, DIPE) y alcoholes (metanol, etanol). Los cual ayudan a que se produzca una mejor y limpia combustión (Sosa, W. *et al.*, 2016).

Gasohol

Es un sustituto de la gasolina, hecho de una mezcla de gasolina y de 10% a 20% de etanol. El gasohol posee un octanaje más alto que la gasolina normal y quema a menor temperatura, por lo cual produce menores emisiones contaminantes tipo NO_x (Bacca, A., & Revelo, D., 2020).

Las mezclas gasolina-etanol, con etanol anhidro al 20% (E-20 %), y etanol hidratado al 20 % (HE-20 %), presentaron los mejores resultados en el análisis de los gases de escape, reduciendo notablemente las emisiones de CO (4-6 %), HC (3-9 %) y NO_x (8-9 %) respectivamente, manteniendo prácticamente constante la emisión de CO₂ (reducciones menores al 1 %). (Suárez, Y. *et al.*, 2020).

Biocombustible

Son aquellos biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída de plantas silvestres o de cultivo, que sustituyen en mayor o en menor parte el uso de la gasolina en el transporte o destinados a producir electricidad. Los biocomponentes actuales proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas. El empleo de estos biocombustibles tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que sobrecalientan la superficie terrestre y aceleran el cambio climático. El uso de la biomasa para consumo energético reduce las emisiones de CO₂ en la atmósfera a diferencia del uso de hidrocarburos, lo que permite disminuir el impacto negativo que se tiene por parte de los combustibles fósiles sobre el cambio climático. Los biocombustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo de los combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo y el carbón; este tipo de combustible se encuentra casi siempre en forma líquida y se usa para accionar los motores de combustión del transporte terrestre. Los biocombustibles más desarrollados y usados son el bioetanol y el biodiesel; otras alternativas son el biopropanol y el biobutanol, que son hasta ahora menos populares (Callejas, E. S., & Quezada, V. G. 2009).

Destilación

La destilación es una operación unitaria que consiste en la separación de los componentes de una mezcla líquida (en la que todos los compuestos son más o menos volátiles) por evaporación y condensación sucesivas. La separación se basa en la diferencia de volatilidades absolutas de los componentes, lo que tiene como consecuencia la formación de un vapor de composición diferente a la del líquido del que procede (Benabithe, Z. *et al.*, 2020).

Cromatografía

La cromatografía de gases es una técnica muy utilizada para separar los diferentes compuestos volátiles de una muestra. La fase móvil es un gas inerte, (nitrógeno o helio) que transporta la muestra volatilizada en el inyector a través de la columna cromatográfica. La fase estacionaria generalmente está constituida por una columna de metil polisiloxano, o derivados de éste. Los diferentes compuestos se separan en función de su grado de volatilidad (punto de ebullición, peso molecular) y su afinidad por la fase estacionaria. Entre los detectores más utilizados cabe mencionar el detector FID (ionización de llama) que, por su alta versatilidad, hace posible la detección de un elevado tipo de compuestos (Chalo Chata, R. 2021).

Desarrollo de la Temática

A continuación, se presenta el desarrollo de la temática con el desglosamiento de cada objetivo

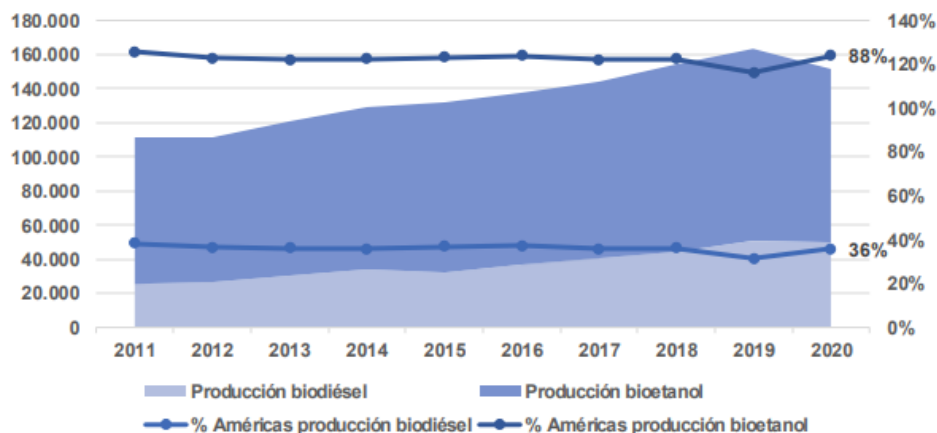
Estado Actual de la Producción de Etanol

Estado Actual Latinoamérica

En la actualidad se estima que a nivel mundial el transporte aéreo emite más de 650.000.000 toneladas métricas de dióxido de carbono, anualmente equivalente a la contaminación de 136.000.000 automóviles, haciéndose un mayor uso de biocombustibles sostenibles crítico para reducir su huella de carbono (Ramos *et al.*, 2016).

El consumo de gasolina mezclada con un 10 % de etanol (E10) en el continente americano es de 637.428.300 m³, siendo Estados Unidos (86,2 %), México (6,21%), Brasil (2,52%), Venezuela (2%), Colombia (0,7%) y Argentina (0,7 %) los países que presentan mayor nivel de consumo, mientras que el 1,67% restante corresponde al resto de países de esta la zona, mientras que la producción de etanol para E10 es de unos 33.623.700 m³, siendo Estados Unidos (16.139.200 m³), Brasil (15.999.200 m³), México (445.200m³), Colombia (270.000 m³), Argentina (230.000m³) y Guatemala (144.000m³) los mayores productores de este producto para estos fines (Suarez Y, *et al.*, 2020).

Dentro de las principales variables, se destaca que las Américas han tomado la iniciativa en la producción de biocombustibles, cuyo desarrollo ha sido verdaderamente promisorio, pues producen el 88% del bioetanol del mundo y el 36% del biodiésel. El uso de los biocombustibles se ha diseminado a lo largo del hemisferio con varias experiencias exitosas (Figura 5)

Figura 5*Evolución de la Producción de Biocombustibles*

Nota. Evolución de la producción de biocombustibles líquidos (en miles de m³) y participación porcentual de las Américas. Tomado de Torroba, A. & Productivo, D., 2021

El creciente consumo de biocombustibles, tanto en las Américas como en el resto del mundo, ha sido claramente incentivado por la formulación de políticas públicas que autorizan y, en muchos casos, promueven su uso. Uno de los instrumentos más utilizados por los países ha sido la reserva de cuotas de mercado denominado “mandatos de uso de biocombustibles” (Torroba, A., & Carvalho, A., 2020).

Durante 2020 se contabilizaron 60 países con obligaciones efectivas de uso de bioetanol, dentro de los cuales 11 se ubican en las Américas. Por otra parte, se contabilizaron 49 países con obligación de uso de biodiésel, de los cuales 9 se ubican en las Américas (Torroba, A. & Productivo, D., 2021).

Un claro ejemplo son la reciente aprobación de la Ley N.º 14.248, a finales de 2021, por parte de las autoridades brasileñas, en que se instituye el Programa Nacional e Bioqueroseno. Con esta Ley, Brasil espera liderar los esfuerzos latinoamericanos dirigidos a desarrollar el

mercado de los biocombustibles avanzados y a garantizar una baja dependencia de estos en el futuro, así como lo hizo con los tradicionales (Torroba, A. & Productivo, D., 2021).

En la República de Colombia se cuenta con importantes recursos biológicos para la producción de biocombustibles. Se destaca en la producción de caña de azúcar y aceite de palma, materias primas utilizadas para la producción de bioetanol y biodiésel (Torroba, A. & Productivo, D., 2021).

De acuerdo con Torroba, A & Brenes.P., (2022), en Colombia la política sobre biocombustibles se desarrolló inicialmente como un esfuerzo para apoyar la economía rural, promover el empleo y con ello la paz, reducir la dependencia de combustibles fósiles, incentivar el desarrollo bajo en carbono y mejorar la calidad del aire. Desde el 2018 se ha impulsado el programa de mezclas voluntarias en biodiesel. Dichas mezclas son reguladas por el Ministerio de Energía y que hacen parte del programa llamado “Club de Biotanqueo”, el cual cuenta con 1.163 vehículos que usan B20. En Colombia existen marcos normativos para apoyar la producción de biocombustibles; sin embargo, las mezclas suelen variar con regularidad dependiendo de la administración. En la actualidad la mezcla de bioetanol corresponde a 5 % y la mezcla de biodiésel es de 10 %, con una variabilidad mínima mes a mes.

Figura 6

Producción Anual de Bioetanol en Colombia (en m3)



Nota. Tomado de Torroba, A., & Brenes, P., (2022).

Figura 7

Importaciones Anuales de Bioetanol en Colombia (en m³)



Nota. Tomado de Torroba, A., & Brenes, P., (2022).

Las importaciones anuales de bioetanol en Colombia hasta 2016, se habían mantenido en torno a los 150 000 m³ y 100 000 m³, cuando se experimentó un crecimiento súbito que llegó a alcanzar los 275 000 m³ en 2019. A partir de dicho año, las importaciones empezaron a enfrentar un decrecimiento, el cual fue leve en 2020 y marcado en 2021, con un volumen de 65 000 m³. Por otro lado, el país no registra exportaciones de magnitud de bioetanol y biodiésel. En el mismo sentido, el país tampoco importa biodiésel (Torroba, A., & Brenes, P., 2022).

En Colombia las investigaciones para utilizar el etanol como combustible comenzaron en 2001, año en que el gobierno aprobó la ley 693 que obligaba al enriquecimiento en oxígeno de la gasolina. Esto se hizo inicialmente para reducir las emisiones de monóxido de carbono de los coches. Regulaciones más recientes eximieron al etanol elaborado a partir de biomasa de algunos impuestos que gravan la gasolina, haciendo así más barato el etanol que la gasolina (Ley 788 de 2002). Al principio todo el interés en la producción del etanol vino de la industria de azúcar existente, ya que es relativamente fácil añadir un módulo para desarrollar etanol al final de una

fábrica de azúcar, y las necesidades energéticas son similares a las que se necesitan para producir el azúcar.

La siguiente tabla muestra los principales proyectos para producción de alcohol carburante en el país, capacidad de producción medida en Litros/día y la respectiva materia prima utilizada.

Tabla 1

Productores de Alcohol Carburante

Localización	Capacidad Litros/día	Materia prima
Hoya del Rio Suarez	300000	Caña de azúcar
Vegachí (Antioquia)	350000	Caña de azúcar
Valle del Cauca	300000	Caña de azúcar
Costa Norte	300000	Caña de azúcar-yuca
Cundinamarca	150000	Caña de azúcar
Llanos orientales	100000	Yuca-caña de azúcar
Eje cafetero	250000	Caña de azúcar
Huila	200000	Caña de azúcar
Nariño	150000	Caña de azúcar

Nota. Proyectos indicativos productores de alcohol carburante. Tomado de Kafarov, V., 2006.

Tecnología Empleada para la Obtención de Etanol

Extracción del Almidón

El almidón se puede obtener utilizando diferentes metodologías de acuerdo a las materias primas de las que se extraiga y según del tipo de compuesto que lo están acompañando. La obtención de almidón se lleva a cabo sobre todo a partir de maíz, papa, trigo y yuca. En algunos casos, por ejemplo, en la papa, los gránulos de almidón se encuentran libres en el interior de las células, de tal modo que su aislamiento es un proceso sencillo; en otros casos como ocurre en los cereales, el almidón se encuentra en el endospermo contenido en una matriz proteica y por ello su extracción es algo más difícil (Melian, D., 2010).

Debe considerarse que al extraer almidón se obtienen además otros componentes menores en variadas concentraciones como proteínas, lípidos, minerales y fibra. Estas impurezas pueden alterar el comportamiento del almidón (Garin, L., 1998).

En cuanto a la papa, la obtención de almidón es simple de acuerdo a lo descrito por Mitch, E., (1984). Las papas se lavan y desintegran en una máquina peladora donde se obtienen varias fracciones que pasan por cedazos rotatorios. Las fibras son retenidas y se obtiene una pulpa de papa que contiene compuestos solubles (azúcares, proteínas, ácidos, sales) y fibras finas, que son aislados a través de separadores centrífugos continuos o hidrociclones y cedazos finos. La lechada purificada de almidón es usada para la producción de derivados del almidón de papa o simplemente es deshidratado y secado.

Carvajal, Y. (2013), agrega que en el proceso de secado el contenido de agua disminuye desde un 80% a 30%, proceso que se lleva a cabo por deshumidificación centrífuga.

Posteriormente viene una deshidratación que baja nuevamente la humedad desde 30% a 10% -

12% y la desagregación de los grumos se realiza por medio de martillos en circuito cerrado con cribas.

Otro proceso descrito por Ojeda, M., (2008), presenta dos etapas de decantación. Cada una de ellas con un tiempo de decantación de 6 horas. Además, se adiciona una solución de NaOH 0,02% p/v, con el objetivo de solubilizar las proteínas.

Posteriormente se ajusta el pH de la solución hasta llegar a 7,0. Después de filtrar la muestra, el almidón obtenido es secado en estufa a una temperatura de $45 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Luego de transcurrido este tiempo, la muestra de almidón pasa por un molino y se empaca.

Según el International Starch Institute (2012), la extracción del almidón de papa se realiza con un sencillo procedimiento: después de licuar la papa se procede a filtrar, se deja en reposo para que el almidón por efecto de la gravedad se precipite, se decanta separando la fase líquida de la sólida (almidón precipitado), se seca esta última parte en estufa o secador hasta lograr la humedad deseada.

En el proceso a partir de maíz (McAloon, A., *et al*, 2000), la extracción de almidón se hace de la siguiente manera, el maíz es lavado para retirar algunas impurezas y posteriormente triturado en la sección de molienda con el fin de llevar el grano a un tamaño entre 3 y 5mm. En el proceso de licuefacción el grano es inicialmente mezclado con agua caliente para garantizar la gelatinización del almidón. Posteriormente se adiciona la enzima α -amilasa encargada de hidrolizar las cadenas de almidón a dextrinas, proceso denominado licuefacción. La masa licuada es mezclada con una porción de vinazas ligeras provenientes del área de tratamiento de residuos con el fin de controlar el pH entre 4-5, y con agua proveniente de la sección de destilación para disminuir el porcentaje de sólidos que entran a la fermentación. Durante la fermentación se

llevan a cabo dos procesos, la sacarificación de las dextrinas para su conversión a glucosa por la acción de la enzima glucoamilasa, y la fermentación de la glucosa a etanol mediante la levadura *S. cerevisiae*, razón por la cual se conoce este proceso como Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF, por sus siglas en inglés) (Madson, P., & Monceaux, D. 2003).

Hidrólisis Química

El almidón tratado con ácidos se rompe en cadenas cortas de dextrina. El grado de degradación depende de la concentración del ácido, la temperatura, y el tiempo de hidrólisis. A medida que actúa el ácido, el peso molecular y la viscosidad de los productos decrecen y el poder reductor aumenta. Los ácidos utilizados para la producción de dextrinas son el ácido clorhídrico y el ácido nítrico. Si se hierve el almidón con ácido clorhídrico 1N durante 1 hora, el almidón se rompe totalmente y se reduce a glucosa esta reacción es conocida como hidrólisis intensa (Isique, V. & Sing L. 2017).

Según Tasic, M., y Veljkovic, V., (2011) la hidrólisis ácida ha sido ignorada principalmente por la necesidad de neutralizar el hidrolizado antes de la fermentación y los costosos materiales de construcción de equipos. Sin embargo, este proceso ofrece muchos beneficios como: una rápida tasa de reacción, un sencillo pretratamiento de las materias primas, un catalizador ácido barato y fácilmente disponible, y una temperatura de reacción relativamente baja con alta concentración de ácido.

Hidrólisis Enzimática

La sacarificación es el proceso que tiene por objeto la transformación del almidón de las materias primas amiláceas en azúcares. Según Coarite, N. *et al.*, (2019) dicha transformación es catalizada por enzimas (amilasas) que se encuentran en la saliva, los jugos pancreáticos, las células de la sangre, las semillas y granos de muchas plantas, en hongos y bacterias. La función

de estas enzimas es romper las moléculas de almidón, dando productos semejantes a los obtenidos por hidrólisis ácida.

Espectrofotometría

Las longitudes de onda de las radiaciones que una molécula puede absorber y la eficiencia con la que se absorben dependen de la estructura atómica y de las condiciones del medio (pH, temperatura, fuerza iónica, constante dieléctrica), por lo que dicha técnica constituye un valioso instrumento para la determinación y caracterización de biomoléculas (Díaz, 2009). Los factores fotométricos para la identificación de una sustancia, son: el espectro de absorción y la curva espectral o barrido de exploración de la sustancia (Bacca, A., & Revelo, D., 2020).

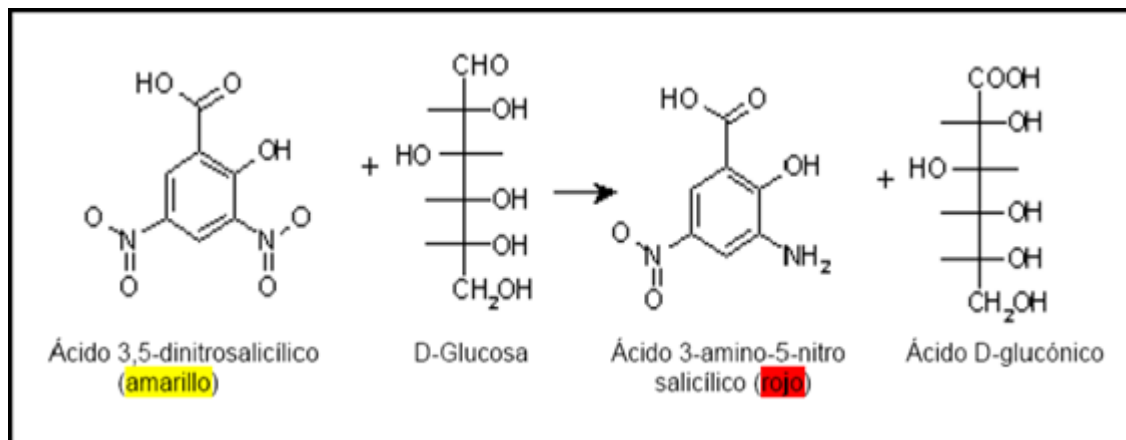
Método de Ácido 3,5 Dinitrosalicílico

Este método utiliza el ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) para calcular la concentración de azúcares reductores en distintos materiales. El procedimiento se basa en una reacción redox que ocurre entre el DNS y los azúcares reductores presentes en la muestra. Este método ha sufrido varias modificaciones a través de los años para adecuarse al análisis de diferentes materiales y su principal ventaja radica en su alta sensibilidad y productividad debido a que es un método espectrofotométrico. El método del DNS no es recomendable utilizarlo para la determinación de azúcares reductores en muestras intensamente coloreadas como mieles y caldos de fermentación que la contengan (Gil, D., *et al.*, 2006).

El método de colorimetría DNS (Ácido 3,5 dinitrosalicílico) se basa principalmente en la reducción del DNS (de color amarillo) por la glucosa u otro azúcar reductor al ácido 3-amino-5-nitrosalicílico (de color rojo ladrillo), (Ver Figura 5) (Miller, G.,1959). En la Figura 5 se muestra la reacción de óxido-reducción, antes descrita.

Figura 8

Conversión de los azúcares reductores mediante DNS

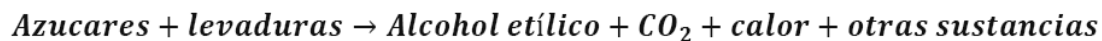


Nota. Tomado de Miller, G., 1959.

Fermentación

A simple vista puede resultar extraño que los microorganismos elaboren compuestos que no parecen tener ninguna función metabólica y que, en realidad no constituyen productos intermedios del catabolismo, cómo, por ejemplo, el etanol y la acetona. Sin embargo, muchos metabolitos secundarios poseen propiedades antimicrobianas, por lo tanto, en el medio ambiente natural podrían ser implicados en procesos competitivos (Vázquez, H., y Dacosta, O., 2007).

El proceso simplificado de la fermentación es según la ecuación de Fermentación.



Las principales responsables de esta transformación son las levaduras. La *S. Cerevisiae*, es la especie de levadura usada con más frecuencia. Por supuesto que existen estudios para producir alcohol con otros hongos y bacterias, como la *Z. mobilis*, pero la explotación a nivel industrial es mínima. A pesar de parecer, a nivel estequiométrico una transformación simple, la secuencia de transformaciones para degradar la glucosa hasta dos moles de alcohol y dos moles

de dióxido de carbono es un proceso muy complejo, pues al mismo tiempo la levadura utiliza la glucosa y nutrientes adicionales para reproducirse (Vázquez, H., y Dacosta, O., 2007).

El rendimiento teórico estequiométrico para la transformación de glucosa en etanol es de 0.511 g de etanol y 0.489 g de CO₂ por 1g de glucosa. Este valor fue cuantificado por Gay Lussac. En la realidad es difícil lograr este rendimiento, porque como se señaló anteriormente, la levadura utiliza la glucosa para la producción de otros metabolitos. El rendimiento experimental varía entre 90% y 95% del teórico, es decir, de 0.469 a 0.485 g/g. Los rendimientos en la industria varían entre 87 y 93% del rendimiento teórico (Vázquez, H., y Dacosta, O., 2007). Otro parámetro importante es la productividad (g/h/L), la cual se define como la cantidad de etanol producido por unidad de tiempo y de volumen.

Los parámetros aquí mencionados se definen con relación a la fase y al modo de funcionamiento del bioreactor o fermentador que es el elemento central para la realización de la fermentación alcohólica (Vázquez, H., y Dacosta, O., 2007).

Condiciones que Deben Medirse y Controlarse en una Fermentación Discontinua

Una vez que el sustrato y el organismo han sido seleccionados es necesario darles las condiciones adecuadas de operación y optimización del sistema. Desde el punto de operación es importante decidir las siguientes variables: temperatura, pH, °Brix, nutrientes y productividad entre otras. Una de estas variables se mide de manera continua y otras intermitentemente. Las variables que se puede medir de manera continua son: temperatura, pH, °Brix, nutrientes y las variables que se puede medir de manera intermitente son: biomasa, producto y consumo de sustrato (Nieto, G., 2009).

Temperatura. La temperatura ejerce un marcado efecto sobre la velocidad metabólica del organismo. La temperatura tiene una influencia directa sobre la velocidad de reacción y esta puede cambiar la configuración de los constituyentes celulares, especialmente de las proteínas y de los componentes de la membrana. La temperatura óptima de crecimiento de las levaduras especialmente de la *S. cerevisiae* es de 30 a 35°C. La temperatura afecta al organismo de manera notable ya que los organismos de una especie dada solo pueden crecer en un rango de temperatura y esto afecta de manera notable al organismo (Nieto, G., 2009).

Brix. Una concentración de azúcar de 10 a 22% es satisfactoria, aunque a veces se emplean concentraciones demasiado altas que actúan de forma adversa sobre las levaduras pues el alcohol producido puede inhibir su acción (Sosa, W. et al., 2016).

Benavides, I., y Pozo, M., (2008) dicen, no se puede pensar en fermentar un mosto con una concentración muy elevada de azúcares. En estas condiciones osmóticas las levaduras simplemente estallarían al salir bruscamente el agua de su interior para equilibrar las concentraciones de solutos en el exterior y en el interior de la célula, es decir lo que se conoce como una plasmólisis.

pH. El pH tiene un marcado efecto en la velocidad de crecimiento y en el rendimiento. El pH óptimo para algunos organismos en especial para las levaduras se encuentra en un rango de 4.0 a 6.0. Un cambio en el valor de pH puede afectar su composición o la naturaleza de la superficie microbiana al disociarse ácidos y bases. Este último puede afectar la floculación de la biomasa o la adhesión a las paredes. El pH tiene una gran influencia en los productos finales del metabolismo anaerobio (Nieto, G., 2009; Murgas, T., y Vásquez, M., 2012).

Aireación. Aunque la producción de alcohol no requiere de oxígeno, en los primeros momentos de la fermentación es necesario una gran cantidad de este gas para la reproducción de las células de levadura en condiciones óptimas. Durante la fermentación pronto se desprende dióxido de carbono y se establecen las condiciones anaerobias (Benavides, I., y Pozo, M., 2008).

Si la fermentación es anaeróbica, la mayor parte del carbono se emplea como energía y solo el 2% se asimila como material celular. *S. cerevisiae* es una levadura que posee alta actividad metabólica, por lo que en un proceso fermentativo en base aeróbica se caracteriza por la producción de biomasa y en base anaeróbica generalmente por la producción de etanol (Murgas, T., y Vasquez, M., 2012).

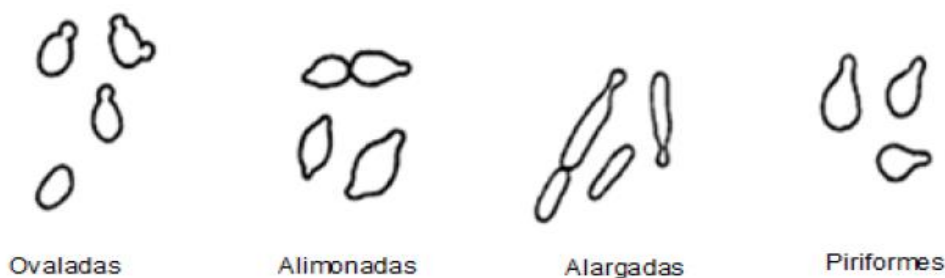
Levaduras. Las levaduras son bastante heterogéneas en su morfología y fisiología; sin embargo, la forma habitual en que se les encuentra es la unicelular. Algunas, además de la forma unicelular o de levadura, pueden presentar micelio. Ambas formas, en estos casos, dan simultáneamente en el medio donde se encuentra el microorganismo. Las levaduras se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza, localizada en el suelo, en la superficie de las frutas, en el néctar de las flores y en ambientes acuáticos. La figura 6 ilustra las distintas formas de levadura que se pueden encontrar (García, C., 2004).

Según Betancur, M. & Gomez, C. (2011), *Saccharomyces cerevisiae* es la especie típica de fermentación alta de la industria cervecera, sus colonias son blandas, húmedas y color crema. Fermentan la galactosa, la sacarosa, la maltosa y la rafinosa y no utilizan nitritos.

Esta es la levadura específica para la fermentación alcohólica las células son de forma redondas ovoides u oviformes, los límites de temperatura para la formación de células se encuentran entre 3 y 40 °C. El óptimo de temperatura para su desarrollo se encuentra alrededor de 30°C.

Figura 9

Esquema de Distintas Formas de Levadura



Nota. Tomado de García, C., 2004.

Requerimientos Nutricionales de las Levaduras. Los azúcares constituyen el mejor alimento energético de las levaduras. Muchas pueden catabolizar la glucosa, ya sea en forma aerobia (respiración) o anaeróbica (fermentación). La mayor parte de las levaduras crecen mejor en medios en los que está disponible una buena cantidad de agua. En general requieren para su crecimiento menos humedad que las bacterias (García, C., 2004).

Crecimiento de Biomasa. La determinación de la biomasa es una de las variables más importantes de un bioproceso ya que su determinación nos lleva a la comprensión de la eficiencia del mismo. Se trata de una variable clave para establecer las tasas de producción, de consumo de nutrientes y el cálculo de los balances de masa de cualquier proceso biológico. Los métodos clásicos de determinación de biomasa son métodos directos que se basan en el número de células o en el peso celular (Sánchez, S., *et al*, 2020).

La cantidad total de biomasa presente en una muestra puede medirse en términos de peso seco por unidad de volumen, ya sea como sólidos en suspensión totales (SST) o sólidos en suspensión volátiles (SSV). Las células se separan del líquido por centrifugación y se expresan en g/mL. La principal desventaja de estas técnicas es que su determinación incluye no sólo microorganismos activos sino microorganismos muertos, material inerte, polímeros extracelulares y materia orgánica adsorbida. Además, no puede aplicarse cuando los sustratos a degradar son insolubles (Sánchez, S., *et al*, 2020).

Etanol

El etanol está presente en diversas bebidas fermentadas tales como cervezas, vinos, licores. Desde la antigüedad se obtenía el etanol por fermentación anaeróbica de una disolución con contenido en azúcares con levadura y posterior destilación. Dependiendo del género de Bebida alcohólica que lo contenga, el alcohol aparece acompañado de distintos elementos

químicos que lo dotan de color, sabor, olor, entre otras características (Jimenez, S., *et al.*, 2008).

A pesar de que el etanol se ha utilizado mayoritariamente como base en la producción de bebidas alcohólicas tiene además una serie de aplicaciones en la industria química, farmacéutica y automotriz (Torroba, A., & Productivo, D. 2021).

El uso de alcoholes, tanto puros como sus mezclas para combustible, no es una idea reciente. En 1906 Henry Ford produjo un automóvil que podía trabajar con alcohol o con gasolina. En el Brasil se conocen estudios desde 1920; y en 1985 ese país producía cerca de 4,8 millones de Tn/año de alcohol, la mayoría dedicada a mezclas carburantes (Tasic, M., & Veljkovic, V. 2011).

El etanol puede ser producido a partir de cualquier material biológico que contenga apreciables cantidades de azúcar o materiales que pueden ser convertidos a azúcar tal como son los almidones y la celulosa (Torroba, A., & Productivo, D. 2021).

Aplicación del Etanol. Además de usarse como bebida alcohólica, el etanol se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como principio activo de algunos medicamentos y cosméticos. Según su pureza el etanol recibe distintas denominaciones: Alcohol Industrial: Es alcohol etílico, normalmente de alta graduación, producido y vendido para cualquier uso, excepto bebidas. Se distribuye generalmente en forma de alcohol puro (96% en volumen), alcohol naturalizado (mezclado con sustancias amargas o tóxicas que lo convierten en no apto para consumo en licores) y mezclas de solventes de marca registrada. Muchas medicinas, productos alimenticios, condimentos y cosméticos no se podrían producir sin él. Se utilizan para producir vacunas, tónicos compuestos, jarabes, tintes, antisépticos, cloroformo, barbitúricos, pegamentos, cosméticos, detergentes, explosivos, tintas, cremas, plásticos y textiles (Figura 7) (Jimenez, S., *et al.*, 2008).

Figura 10

Aplicación del Etanol



Nota. Tomado de (Antonio Castro, 2019)

Destilación

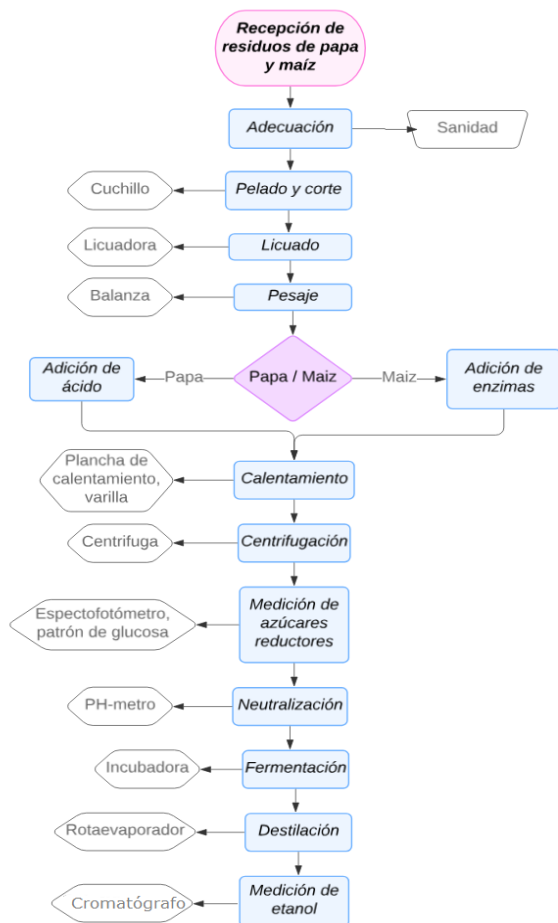
Un líquido entra en ebullición cuando al calentarlo su presión de vapor se iguala a la presión atmosférica. En una destilación a vacío la presión en el interior del equipo se hace menor

a la atmosférica con el objeto de que los componentes de la mezcla a separar destilen a una temperatura inferior a su punto de ebullición normal. Una destilación a vacío se puede realizar tanto con un equipo de destilación sencilla como con un equipo de destilación fraccionada. Para ello, cualquiera de los dos equipos herméticamente cerrado se conecta a un sistema de vacío-trompa de agua o bomba de vacío de membrana o aceite a través de la salida lateral del tubo colector acodado (Decheco, E., 2016).

Un tipo de destilación a vacío muy utilizado en un laboratorio químico es la evaporación rotatoria. Este tipo de destilación se realiza en equipos denominados genéricamente rotavapores y se usa para eliminar con rapidez el disolvente de una disolución en la que se encuentra presente un soluto poco volátil habitualmente a temperaturas próximas a la temperatura ambiente, con lo que se minimiza el riesgo de descomposición del producto de interés que queda en el matraz de destilación (Heredia E., *et al.*, 2000).

Cromatografía

Para realizar una separación por cromatografía de gases, se inyecta una pequeña cantidad de la muestra a separar en una corriente de un gas inerte a elevada temperatura, esta corriente de gas atraviesa una columna cromatográfica que separa los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía gas - líquido). Los componentes separados emergen de la columna a intervalos discretos y pasan a un sistema de detección adecuado, o bien se dirigen hacia un dispositivo de recogida de muestras (Larrea, R., 2019).

Figura 11*Diagrama de Flujo*

Nota. Diagrama de Flujo para la obtención de etanol a partir de biomasa residual de papa (*Solanum tuberosum*) y Maíz (*Zea mays*) a escala de laboratorio. Tomado de Este estudio

Novedosas Fuentes de Productos Agrícolas Para la Obtención de Biocombustible

Los biocombustibles líquidos, denominados también biocarburantes, son productos que se están empleando como sustitutos de la gasolina y del ACPM en vehículos los cuales son obtenidos a partir de materias primas de origen agrícola. Actualmente, muchos países promueven la idea de sembrar sus propios combustibles, para no depender de importaciones o de reservas

agotables y, colateralmente generar empleos estables y de calidad, teniendo en cuenta que el alcohol se obtiene a partir de los ciclos vegetativos de productos agrícolas tales como remolacha, maíz, cebada, papa, yuca, eucalipto, girasol, entre otros, incluyendo la caña de azúcar, cultivo que está bien difundido y que se convierte en la principal fuente para la producción de alcohol. De ese cultivo se tienen muchas experiencias, capacidad y manejo en Colombia (en particular en el Valle del Cauca), por su uso y encadenamiento productivo con el Etanol. En este escenario, el gobierno nacional ha planteado entre sus intereses estratégicos, el tema de los alcoholes carburantes. Política también incentivada por el aumento acelerado de los precios de los carburantes, costo que está afectando de manera significativa, a algunos sectores de la producción que demandan como insumo básico combustibles fósiles (Cortes. M. *et al.*, 2008).

En el área de bioetanol se han realizado estudios de factibilidad técnica para la producción a partir de diferentes fuentes de biomasa como arroz (Vásquez, R. 2019), yuca (Liscano, M. 2014)), bore (Kafarov. V. *et al.*, 2006), papa (Sosa, W. *et al.*, 2016), arracacha (Almeida, R., 2017), bagazo de la caña de azúcar (Alvarado, L. 2021) y hoja de la palma africana (Kafarov. V. *et al.*, 2006). También se han elaborado trabajos en diferentes tecnologías de producción de bioetanol como la discontinua (Carvajal, Y. 2013) y continua (Rojas, C. & López, B. 2014), además de la deshidratación de etanol (Carvajal, Y. 2013); diseño y montajes de plantas piloto; estudios de factibilidad ambiental para la producción de etanol y el desarrollo de sistemas de tratamiento para vinazas. En la producción de combustibles se han realizado estudios de equilibrio químico de mezclas y aplicaciones para motores de gasolina y de diésel (Salvador, A. 2010).

A partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera) de las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los

tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-celulosas o de residuos orgánicos (Da Costa O, & Vázquez, H. 2007). Según la Agencia Internacional de Energía, el potencial de esta fuente de energía es considerable, pues se calcula que el bioetanol podría sustituir un 25% de la gasolina utilizada como combustible en el año 2025. El biogás contiene entre 55 y 70% de CH₄, el cual puede ser utilizado como una importante fuente energética en la combustión de motores, en turbinas o calderas utilizados en diferentes usos industriales.

La tabla 2 muestra la concentración en masa seca de almidón presente en varios alimentos que pueden ser alternativas fuentes para la obtención de biocombustible.

Tabla 2

Almidón Presente en Diferentes Alimentos

Cantidad de almidón presente en algunos alimentos	
Alimento	% en masa de Almidón
Cereal	65 – 75
Edulcorantes	10 – 12
Raíces y Tuberculos	70 – 75
Frutas	5 – 8
Hortalizas	8 – 15
Legumbres	50 – 60

Nota. Almidón Presente en Diferentes Alimentos. Los carbohidratos en la nutrición humana, estudio de alimentación y nutrición año 1997. Tomado de FAO (1999).

Papa

Ha aumentado el interés en el uso de la papa como sustrato para la obtención de etanol debido a sus menores costos iniciales y a un mayor rendimiento por área de cultivo que el maíz (Srichuwong, S. *et al.*, 2012; Zhang, L. *et al.*, 2011). La papa es uno de los cultivos con un gran

valor como fuente de alimento, pero del que se desperdicia en su cosecha y en la industria procesadora entre un 5% hasta un 20% donde una gran cantidad de residuos constituidos por almidón se drenan (Hashem. M. y Darwish, I. 2010; Lesiecki, M. *et al.*, 2012) por lo tanto se puede utilizar como medio de cultivo en procesos fermentativos (Izmirlioglu, G. y Demirci, A. 2012) debido a su almidón y azúcares fermentables (Guerra-Rodríguez, E. *et al.*, 2012) evitando tratamientos para aguas residuales (drenan (Hashem. M. y Darwish, I. 2010). El destino actual de estos residuos es la alimentación animal y elaboración de abono (Izmirlioglu, G. y Demirci, A. 2012).

La producción de etanol a partir de tubérculos de papa es de aproximadamente 1400-1800 L/ha o más de 74 L/ton. Esto significa que a partir de excedentes de papa podrían ser potencialmente producidos 1200-7200 millones de litros de etanol combustible al año (Tasic, M. y Veljkovic, V. 2011).

La materia prima representa el mayor porcentaje dentro de los costos de producción de etanol (McAloon, A. *et al.*, 2000) sumando más del 60%. Una materia prima, abundante y barata, es la biomasa lignocelulósica (principalmente residuos agroindustriales y forestales) pero su procesamiento no es aún rentable. De lo anterior se deriva la importancia de evaluar económicamente el proceso de obtención de bioetanol en un país como Colombia, rico en biomasa con alto contenido en azúcares y almidón, y donde se requiere la producción a gran escala de alcohol carburante (Montoya, M. *et al.*, 2005)

Las papas son una materia prima atractiva para la producción de bioetanol a causa de su gran producción en todo el mundo. Los recursos no renovables (combustibles fósiles) en el país día a día se están agotando, debido a la gran demanda que estos generan a nivel mundial por las

diferentes aplicaciones y usos que estos tienen en procesos industriales (Tasic, M. y Veljkovic, V. 2011).

Aunque la producción de bioetanol a partir de papa es actualmente poco común en el mundo y por lo tanto poco estudiado, la papa se está considerando como un potencial cultivo de materia prima de bioetanol (Khan, R. *et al.*, 2012).

Es común hablar de la necesidad de agregar valor a los productos agrícolas dado el contexto del departamento de Nariño en el cual es muy común el cultivo de papa (Tabla 3) (Juajinoy, E y Rosero, F. 2008).

Tabla 3

Almacenamiento (ton) de Papa en el Departamento de Nariño

Variedad	2018	2019	Var. %
Betina	5	5,638	9
Criolla	34,512	29,687	-14
Diacol Capiro	82,178	73,961	-10
ICA-Nevada	367	352	-4
ICA-Única	52,683	42,206	-20
Morasurco	3,032	3,51	16
Papa Rubí	3,286	2,347	-29
Papas Negras Otras	7,354	6,305	-14
Parda Pastusa	18,493	15,311	-17
Pastusa Suprema	52,682	37,242	-29
Superior	17,662	27,3	55
Total	277,409	243,859	-12

Nota. Almacenamiento (ton) de papa en el departamento de Nariño, año 2018 – 2019. Tomado de SIPSA – DANE – Cálculos Sistemas de Información FNFP-Fedepapa.

En 2018, la producción mundial de la papa fue de 458 millones de toneladas, donde alrededor de casi una tercera parte representa excedentes de papa. En Colombia el rendimiento en producción de papa fue de 35t/ha (FAO, 2018).

Según la Superintendencia de Industria y Comercio y FEDEPAPA 2011, del total de papa producida en el país, aproximadamente el 8% va dirigido a la industria, el 10% corresponde a autoconsumo, el 64% se dirige a las centrales mayoristas y el remanente es papa para semilla.

Nariño como tercer productor de papa en Colombia obtuvieron una producción de 518.251,5 toneladas (FINAGRO, 2009). Una parte de la producción de papa cada año, entre 5 y 30%, se destina como excedentes de papa (FAO, 2007). La producción de etanol a partir de tubérculos de papa es de aproximadamente 1400-1800 L/ha o más de 74 L/ton. Esto significa que a partir de excedentes de papa podrían ser potencialmente producidos 1200-7200 millones de litros de etanol combustible al año (Tasic, M. y Veljkovic, V. 2011). Al mezclarse la gasolina con el etanol, se produce una combustión más limpia en los motores, disminuyendo así las emisiones de dióxido de carbono. El etanol sustituye, asimismo, al plomo en la gasolina en su papel de sustancia incrementadora del octanaje. El consumidor recibirá un combustible de mejor calidad (Castro, C. *et al.*, 2011).

En 2009 Tasic, M. y colaboradores usaron como ácido el ácido clorhídrico, HCl 1 M con una relación de material vegetal (papa dulce) y solución de ácido de 1:2 (w/v) con un rendimiento de 69 L/ton que se logró después de 18 h de fermentación, lo que confirma que este producto de la agricultura se puede procesar con éxito por hidrólisis ácida en condiciones de reacción relativamente ligeras para utilizarse en la producción de bioetanol; en 2010 Rani, P. y colaboradores obtuvieron etanol a partir de papa mediante una hidrólisis enzimática y una fermentación a 30°C por 48 horas resultando en una producción de 56.8 g/L de etanol. Un

rendimiento menor de 35 g/L de etanol con un pH de 5.5 y un tamaño del inóculo del 3% obtuvieron Izmirlıoglu, G. y Demirci, A. en 2012.

González, J. y Molina, M. en el 2006, estudiaron la hidrólisis enzimática y la fermentación de la papa (*S. tuberosum*), a fin de determinar las mejores condiciones para producir alcohol, quienes en el seguimiento del proceso de fermentación alcanzaron una concentración máxima de alcohol de 10,33% v/v. El rendimiento de etanol del proceso fue de 94,5 L de etanol/Tm de papa, utilizando una concentración de 20% m/v de sustrato.

Maíz

En cuanto al maíz, (*Zea mays*), es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen y juntamente con el arroz y el trigo, son principales en la alimentación a nivel mundial. El maíz como fuente de almidón es la principal materia prima utilizada en Estados Unidos, China y Canadá para obtener el 95 %, 90 % y 85 % de su producción total anual de bioetanol, respectivamente (Hryczyński, E. *et al.*, 2023).

En 2020, según Fenalce, el cultivo alcanzó un área de siembra de 345.069 hectáreas y una producción de 1.380.241 toneladas (principalmente de maíz tecnificado amarillo, 755.824 t, y blanco, 341.302 t, y el restante de maíz tradicional, 283.085 t). A escala departamental, la mayor producción es la del Meta, Córdoba, Tolima y Valle del Cauca. El maíz representa el 4,4% de la producción agrícola nacional y se consolida como el cultivo con la tercera mayor extensión del país (10%), solo superado por el café (15%) y el arroz (13%) (Govaerts, B. *et al.*, 2019).

Según Coronado, J. *et al.*, (2020), se calcula que el maíz participa con un 3% del PIB agropecuario y es responsable del 4% de los empleos agrícolas, con lo que es sustento de aproximadamente 200.000 familias.

Tabla 4*Producción de Maíz Amarillo y Maíz Blanco (ton)*

Clase	Periodo				Indicadores	
	2018 A	2019 A	2020 A	2021 A	Promedio (2018A-2020A)	Indicador
Amarillo						
Córdoba	139108	39600	43860	61000	74189	Riesgo Bajo
Meta	202950	62650	98400	90300	121333	Riesgo Bajo
Tolima	97272	35543	64050	76000	65622	Riesgo Alto
Valle	68138	33110	29725	30217	43656	Riesgo Bajo
Blanco						
Córdoba	49145	59400	65790	56500	59112	Riesgo Bajo
Meta	31800	6750	35200	1300	24583	Riesgo Bajo
Tolima	31853	20205	22650	5350	24903	Riesgo Bajo
Valle	36125	49880	40375	41569	42127	Riesgo Bajo

Nota. Producción por semestre de maíz amarillo y maíz blanco (toneladas). Tomado de Coronado, J. *et al.*, 2020.

En cuanto a la fuente como el maíz en biomasa también se ha estudiado mediante hidrólisis enzimática y fermentación a 64° C y 500 rpm se alcanza una concentración de etanol de 14.6% v/v y una productividad de 2.5 g/L (48 horas de proceso) esto según Peláez, H. y colaboradores en 2011.

En cuanto a los rendimientos a etanol, los procesos modernos de molienda en húmedo y molienda en seco poseen eficiencias superiores al 95% en la producción de etanol a partir de almidón con rendimientos entre 419,4 – 460,6 l/ton de maíz con moliendas en seco y de 403,1 l/ton de maíz con molienda en húmedo (Madson, P. y Monceaux, D. 2003).

Según Hryczyński, E. *et al.*, (2023). encontraron un porcentaje del 74% de almidón contenido en el maíz, lo que implica una conversión en etanol de 0,411 l/kg de maíz, proyectando una producción de 3.293,50L/ha, de etanol tomando como referencia un rendimiento promedio de 80qq/ha. Bajo condiciones ideales se alcanza entre un 90 – 95 % del rendimiento teórico en producción de etanol.

Los costos de operación del proceso a partir de maíz son mucho más altos que los del proceso a partir de papa, debido a los elevados costos de producción de maíz en el país. Las ganancias por venta de productos son mayores en el proceso a partir de maíz ya que se tiene en cuenta la obtención de subproductos (DDGS). En trabajos posteriores se podrían considerar subproductos a partir del proceso con maíz tales como carbón bagazo, cachaza y levadura como alimento animal, compost de la digestión aeróbica de vinazas, entre otros (Cerón, L., *et al.*, 2018).

En Colombia el rendimiento de producción de maíz en el año 2020 fue de 1,83 ton/Ha, mientras que a nivel mundial Estados Unidos es el país con el mayor rendimiento (8.9 ton/Ha) (FAOSTAT, 2023). El bajo rendimiento en el país explica el hecho de que se importe el 75% del maíz requerido para la industria avícola y porcícola (Montoya, M. *et al.*, 2005).

La obtención de subproductos dentro del proceso a partir de maíz es un punto primordial para la sostenibilidad del mismo, pues como puede apreciarse de no ser por la generación de subproductos, el costo de producción del etanol estaría por encima del precio de venta del producto (Montoya, M. *et al.*, 2005).

Remolacha

El proceso de obtención de bioetanol puede dividirse en tres grandes etapas: extracción del material de partida, proceso de fermentación y proceso de deshidratación. La primera etapa comprende el lavado de la materia prima, la molienda de la misma para facilitar la extracción de

la sacarosa, el proceso de extracción y por último filtración. La segunda etapa abarca la fermentación alcohólica, conversión de carbohidratos en alcohol y dióxido de carbono por la acción de levaduras (en la remolacha la misma levadura contiene la enzima que hidroliza la sacarosa), y centrifugación del mosto obtenido donde se separan los residuos sólidos generados en la fermentación, purificando el mosto. Por último, se encuentra el proceso de deshidratación del etanol obtenido, esta acción se realiza con una destilación azeotrópica seguida de una destilación extractiva (Bocero, F., *et al.*, 2018).

Respecto al proceso productivo se requieren aproximadamente 10 kg de remolacha por litro de bioetanol producido (99% V/V). (Bocero, F., *et al.*, 2018).

Cáscara de Plátano

Es una fuente abundante de material celulósico, que es el constituyente externo del banano, representa alrededor del 40% en peso y tiene el potencial de producir alcohol; sin embargo, es necesario un procesamiento químico y bioquímico para convertir estos polímeros en azúcares monoméricos (Bonilla, H. R. *et al.*, 2019).

A partir de los residuos lignocelulósicos de la cáscara de banano maduro, se puede obtener bioetanol, cuyo rendimiento obtenido de 7% v/v. (Bonilla, H. R. *et al.*, 2019).

Caña de Azúcar

La producción de Etanol a partir de la agroindustria azucarera obliga a la integración de la destilería con la producción de azúcar, lo que posibilita, no sólo el empleo de las mieles finales, sino también de los jugos, mieles intermedias y el uso del bagazo como energético (Aguilar-Rivera, 2007).

Si se compara, el azúcar de caña crece en agrupaciones más densas que el maíz, así que un acre de azúcar de caña correspondiente a 40048m² puede producir al menos 2.333 litros de etanol, comparado con los 1.514 litros de etanol por acre de maíz (Aguilar-Rivera, 2007).

Yuca

La estructura compleja de los materiales lignocelulosicos, hace difícil el acceso a los azúcares fermentables, por lo tanto, se implementa un pretratamiento adecuado, junto a estrategias de sacarificación y fermentación eficientes. Uno de estos materiales lignocelulósicos proviene del cultivo de yuca, el cual genera 96,2% de residuos sólidos al año, entre los que se incluyen los tallos de yuca que representan el 40% de la planta y que en su mayoría son desechados en el ambiente (Liscano, M. 2014).

La conversión del almidón de yuca a bioetanol utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* sin la utilización de nutrientes adicionales. Se trabajó una concentración de 4% de almidón y se evaluó las etapas de hidrólisis enzimática, gelatinización y fermentación. Para la fermentación se estableció diferentes velocidades de agitación y se caracterizó los azúcares fermentables en las etapas del proceso utilizando las técnicas espectrofotométricas (Miller) y refractométricas obteniéndose una eficiencia de fermentación entre el 85,78-98,03%. El bioetanol obtenido se caracterizó por medio de cromatografía de gases, obteniéndose una concentración de 78-87% y una eficiencia de conversión de azúcares entre el 17,95-23,93% (Ocampo, D, & Montenegro, 2016).

Castaño, P. y colaboradores, (2011) evaluaron la producción de etanol a partir de harina de yuca en un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación. Se obtuvo una concentración de etanol de 14,6% v/v con una productividad de 2.5 g/h (48 horas de proceso) y con una

concentración de harina de ñame de 28% m/v empleando la enzima STARGENTM0.01 (mezcla de alfa amilasa y glucoamilasa) en la hidrólisis y la *S. cerevisiae* en la fermentación.

Conclusiones

En la actualidad se generó un aumento en la producción de etanol lo que favorece el mercado incrementando ingresos y generando empleo, además de limitar desperdicios de la producción excedente de cultivos. Se evidencia un aumento en la producción de etanol lo que favorece el mercado incrementando ingresos y generando empleo, además de limitar desperdicios de la producción excedente de cultivos.

La tecnología empleada paso a paso para el tratamiento y aprovechamiento de la biomasa residual de papa y maíz en la obtención de etanol hace referencia a la hidrólisis del almidón, seguido de la espectrofotometría, fermentación, obtención de etanol, aplicación del etanol, destilación y finalmente cromatografía, se identificó variaciones del proceso, específicamente en la obtención de almidón, con respecto a la papa es muy sencillo se licua con agua y se deja en reposo para que el almidón se precipite, mientras que con el maíz es necesario la intervención de enzimas para garantizar la gelatinización del almidón.

Otras fuentes alternas de productos agrícolas como lo es la remolacha, cáscara de plátano, caña de azúcar y yuca de las cuales se obtiene biocombustible líquido, en cada una de ellas en este estudio se referencia su rendimiento de forma respectiva.

Este estudio demuestra la aplicabilidad que tienen fuentes como la papa y el maíz para la producción de biocombustibles, con ello se reducen los contaminantes y residuos, además se consultó la tecnología empleada para tratar de maximizar la producción del etanol como producto final.

Teniendo en cuenta que las materias primas estudiadas papa y maíz muestran un buen potencial productivo, estos representan un buen estímulo para los productores de las mismas,

especialmente enfocados en la agregación de valor, ya que tendría un aporte importante en la economía regional, en el ambiente y la sustentabilidad del sistema productivo.

Recomendaciones

Realizar este estudio llevado a la práctica investigativa a escala piloto para determinar las condiciones óptimas en obtención de etanol y así posteriormente aplicarlo a escala industrial.

Realizar estudios financieros que permitan establecer la viabilidad de obtención de etanol a partir de la papa y del maíz en el departamento de Nariño.

Evaluar la hidrólisis con ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) con el fin de determinar diferencias en el grado de hidrólisis de papa y maíz, y la consecuente producción de etanol.

De esta monografía, surge la necesidad de estudiar otras materias primas amiláceas diferentes a las aquí utilizadas (maíz, papa), tales como la yuca, sorgo y el plátano, las cuales son de amplia disponibilidad en Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar-Rivera, N. (2007). *Bioetanol de la caña de azúcar. Avances en investigación Agropecuaria*, 11(3), 25-39.
- Alvarado Ludeña, G. R. (2021). *Obtención de Bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante hidrólisis enzimática* (Bachelor's thesis).
- Antonio Castro. (16 de Mayo de 2019). *Química del vino*. Obtenido de Fandom:
<https://quimicadelvino.fandom.com/es/wiki/Etanol?file=Obtencion-de-etanol-a-partir-de-papel-de-reciclo-14-728.jpg>
- Bacca, A. J., & Revelo, D. A. (2020). *Obtención de bioetanol mediante proceso de extracción-fermentación de almidón de papa*. *Alimentos Hoy*, 28(50), 28-43.
- Benavides, I. M., Pozo, M. M. (2008). *Elaboración de una bebida alcohólica destilada (vodka) a partir de tres variedades de papa (Solanum tuberosum) utilizando dos tipos de enzimas*. Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador. pp. 143
- Benabithe, Z. Z., Vanegas, D., Montoya, J. C. R., & Velásquez, J. A. (2020). *Caso de estudio de la destilación etanol-agua en operación continua y discontinua y su simulación con ecuaciones cúbicas de estado y modelos de actividad*. *TecnoLógicas*, 23(49), 201-227.
- Betancur, M. & Gomez, C. (2011). Un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea - ethanol production from cassava flour in simultaneous enzymatic hydrolysis and fermentation. pp. 158-166.
- Bocero, F., Pellicano, M. E., Ventura, L., & Talamás, S. (2018). *Diseño de una planta de producción de Bioetanol a partir de Remolacha Azucarera* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).

- Bonilla, H. R., Balón, C. M., Moreno, A. P., & Pesantez, F. R. (2019). *Estudio cinético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales de la cáscara de banano maduro*. *Industrial data*, 22(1), 187-194.
- Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). *Los biocombustibles*. *El cotidiano*, (157), 75-82.
- Cardona, C. & Sanchez, O. (2006). *Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass*. *Energy*. pp. 2447-2459. doi: 10.1016/j.energy.2005.10.020.
- Carvajal, Y. A. (2013). *Procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar* (Doctoral dissertation, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas Especialidad Ingeniería Química).
- Castaño, P., Cardona, B., Mejia, G. & Acosta, C. (2011). *Producción de etanol a partir de harina de yuca en un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea*. *Dyna*, año 78, Nro. 169. Medellín. ISSN 0012-7353. pp. 158-166.
- Castro, C., Zuluaga, R., Putaux, L., Caro, G., Mondragon, I. & Gañán, P. (2011). *Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes*. *Carbohydrate Polymers*, 84(1). pp. 96-102. doi:10.1016/j.carbpol.2010.10.072.
- Cerdá, E. (2012). *Energía obtenida a partir de biomasa*. *Cuadernos económicos de ICE*, (83).
- Cerón-Lasso, M., Alzate-Arbeláez, A. F., Rojano, B. A., & Ñuztez-Lopez, C. E. (2018). *Composición fisicoquímica y propiedades antioxidantes de genotipos nativos de papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)*. *Información tecnológica*, 29(3), 205-216

- Chirinosa, R., Mendozaa, R., Aguilar-Gálveza, A., & Camposa, D. (2017). *Hidrólisis química y enzimática de extracto de yacón (Smallanthus sonchifolius) para la producción de fructosa*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 83(2), 200-212.
- Coarite, N. A. N., Mollisaca, G. L. N., Gallardo, E. P. M., & Ortiz, L. S. (2019). *Hidrólisis enzimática en harina de quinua y tarwi por efecto de α -amilasa*. Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 17(1), 64-73.
- Coronado, J. J. T., Solano, L. M. A., Duran, J. R., Guerrero, K. V. O., Sierra, J. C., & Kerguelén, S. M. (2020). *Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz (Zea mays L.) en Colombia*. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, (1).
- Decheco Egúsquiza, A. C. (2016). *Aprovechamiento de residuos de Ananas comosus (piña) para la producción de etanol por vía fermentativa de Saccharomyces cerevisiae*.
- Esteban, L. & Carrasco, J. (2011). *Biomass resources and costs: Assessment in different EU countries*. Biomass and Bioenergy, Vol. (35). pp. 21-30. doi:10.1016/j.biombioe.
- FAO (1999). *Los carbohidratos en la nutrición humana, estudio de alimentación y nutrición año 1997*.
- FAO (2007). FAOSTA. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. (April 2010). <http://faostat.fao.org>.
- FAO (2018). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
- FAO (2023). FAOSTA. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. <http://faostat.fao.org>.
- FINAGRO, (2009). *Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario*. <https://www.finagro.com.co/>
- García, C. (2004). *Introducción a la microbiología*. Editorial EUNED. Edición 2. pp. 109.

- García, H., & Calderón, L. (2012). *Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia*.
- Garin, L. (1998). *Extracción y caracterización del almidón de quinua (Chenopodium quinoa Willd) y amaranto (Amaranthus cruentus L.)*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. pp. 54. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Gil, D. B., Bocourt, E. C., & Maqueira, Y. D. (2006). *Determinación de azúcares reductores totales en jugos mezclados de caña de azúcar utilizando el método del ácido 3, 5 dinitrosalicílico*. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(2), 45-50
- Guerra-Rodríguez, E., Portilla-Rivera, O., Ramírez, J. & Vázquez, M. (2012). *Modelling of the acid hydrolysis of potato (Solanum tuberosum) for fermentative purposes*. *Biomass and Bioenergy*, Vol. (42). pp. 59-68.
- Govaerts, B., Vega, D., Chávez, X., Narro, L., San Vicente, F. M., Palacios, N., & Tapasco, J. (2019). *Maiz Para Colombia Vision 2030*.
- Hashem, M. & Darwish, I. (2010). *Production of bioethanol and associated by-products from potato starch residue stream by Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34(7). pp. 953-959. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953410000589> [Accessed March 3, 2013].
- Hryczyński, E., Yanevich, C. E. D., Brachna, D. O., López, W. G., & Sánchez, C. N. (2023). *Generación de bioenergía con híbridos de maíz en la provincia del Chaco. Un aporte al desarrollo regional*. *South Florida Journal of Development*, 4(5), 1853-1860.
- International Starch Institute A/S. (2012). Agro Food Park 13, DK-8200 Aarhus N, Denmark.
<http://www.starch.dk/isi/starch/tm5www-potato.asp#top>

- Izmirlioglu, G. & Demirci, A. (2012). *Ethanol Production from Waste Potato Mash by Using Saccharomyces Cerevisiae*. Applied Sciences, Vol. 2(4). pp. 738-753. Available at: <http://www.mdpi.com/2076-3417/2/4/738/> [Accessed February 28, 2013].
- Jimenez, S., Linda, L. & Acevedo, E. (2008). *Evaluación comparativa de la actividad fermentativa de Células libres e inmovilizadas de Saccharomyces cerevisiae sobre cáscaras de naranja y gluten. para la obtención de Grado el Título de ingeniero Químico*. Cartagena, Colombia
- Juajino, E. & Rosero, F. (2008). *Obtención, caracterización y evaluación de almidón nativo de papa, obtenido a partir de las variedades: Diacol capiro, Parda pastusa, Parda suprema e Ica Nariño (roja o roja Nariño) comúnmente sembradas en el departamento de Nariño*. Tesis (pregrado). Facultad de Ingeniería Agroindustrial. Universidad de Nariño. pp. 134. Nariño, Colombia.
- Kafarov, V., Ojeda, K. & Sánchez, E. (2006). *Situación y perspectiva de biocombustibles en Colombia*. Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural.
- Khan, R., Nawaz, A., Ahmed, M., Khan, M., Azam, F., Ullah, S. & Khan, N. (2012). *Production of bioethanol through enzymatic hydrolysis of potato*. African Journal of Biotechnology, Vol. 11(25). pp. 6739-6743.
- Larrea Rosero, F. A. (2019). *Obtención de bioetanol mediante digestión enzimática de almidones de yuca, papa y camote* (Bachelor's thesis, Quito).
- Lesiecki, M., Bialas, W. & Lewandowicz, G. (2012). *Enzymatic hydrolysis of potato pulp*. Acta scientiarum polonorum. Technologia alimentaria, Vol. 11(1). pp. 9-53. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22230975>.

- Liscano Martínez, Y. (2014). *Producción de bioetanol a partir de tallos de yuca* (Doctoral dissertation).
- Madson, P. W., & Monceaux, D. A. (2003). *Fuel ethanol production*, KATZEN International. Inc., Cincinnati, O., USA.
- MARTÍNEZ, H. (2006) "*La papa en Colombia. Una mirada global a su estructura y dinámica 1991-2005*", Ministerio de agricultura y Desarrollo Rural. Documento de Trabajo, N° 100, Observatorio Agrociencias Colombia. pp. 30. Bogotá, Colombia.
- Martínez, P. E. P. (2014). *Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual*. Innovaciencia, 2(1), 45-52.
- McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K. y Wooley, R. (2000). *Determinación del costo de producción de etanol a partir de almidón de maíz y materias primas lignocelulósicas* (No. NREL/TP-580-28893). Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), Golden, CO (Estados Unidos).
- McMurry, J. (1998). *Química Orgánica*. Quinta Edición Madrid: McGraw Hill. pp. 1059.
- Medina, J. A., & Salas, J. C. (2008). *Caracterización morfológica del grano de almidón nativo: Apariencia, forma, tamaño y su distribución*. Revista de ingeniería, (27), 56-62.
- Miller, G. (1959). *Use of DNS acid reagent for determination of reducing sugar*. Analytical Chemistry. Vol. 31 (3). pp. 426-428.
- Ministerio de agricultura y ganadería. (2019). *Dirección Central Oriental. Caracterización de la Agrociencia de Papa*. Cartago, Costa Rica.
- Mitch, E. (1984). *Potato Starch: Production and Uses*. In: STARCH: Chemistry and Technology. Second Edition. Academic Press, Inc. New York, EE.UU. pp. 479- 490

- Montoya, M. I., Quintero, J. A., Sánchez, O. J., & Cardona, C. A. (2005). *Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz*. Revista Universidad EAFIT, 41(139), 76-87.
- Morrison, R. & Boyd. (1996). *Química Orgánica*. Quinta Edición. Addison–Wesley Iberoamericana. USA
- Murgas, T. & Vasquez, M. (2012). *Evaluación de la obtención de bioetanol a partir del almidón de ñame (dioscorea rotundata, dioscorea alata y dioscorea trifida) mediante la hidrólisis enzimática y posterior fermentación*. Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingenierías, arquitectura, arte y diseños programa de ingeniería química. pp. 138. Cartagena, Colombia.
- Nieto, G. (2009). *Evaluación de las condiciones de la fermentación alcohólica utilizando Saccharomyces cerevisiae y jugo de caña de azúcar como sustrato para obtener etanol*. Extraído del sitio web de la escuela politécnica del ejército ecuatoriano.<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/990/1/T-ESPE-026782.pdf>
- Ocampo, D. G. R., & Montenegro, N. R. *Producción de bioetanol a partir del almidón de yuca* (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial).
- Odar Jiménez, M. L., & Parraguez Llaguento, D. A. (2019). *Evaluación del Rendimiento de la fermentación alcohólica a partir del almidón de la papa (Solanum tuberosum), camote (Ipomoea batata) y olluco (Ullucus tuberosus)*.
- Ojeda, M. (2008). *Comparación de Algunas Propiedades Físicas y Composición Química del Almidón de Piñón (Araucaria araucana (Mol) K. Koch), Papa (Solanum tuberosum L.*

- ssp. tuberosum Hawkes) y Maíz (Zea mays L.).* Universidad Austral de Chile. pp. 68. Valdivia, Chile.
- Ospina, M. (2008). *Montaje de curvas de calibración para análisis de gomas, fosfatos, sílice, azúcar, y sulfitos por espectrofotometría UV - visible en el laboratorio de aseguramiento de calidad del Ingenio Pichichi S. A.* Universidad Tecnológica de Pereira. pp. 144. Pereira, Colombia.
- Palacios, T., Ramírez, C., López, A., Maliza, V., Peña, E., & Moína, H. L. B. (2020). *Uso del almidón de papa súper chola (solanum tuberosum) en la producción de una bebida alcohólica.* La Ciencia al Servicio de la Salud, 11(Ed. Esp.), 121-127.
- Pecsok, R. L., Donal, L. 1983. *Métodos modernos de análisis químicos.* Editorial limusa.
- Pelaez, H., Betancur, M., Gomez, C. & Cardenas, A. (2011). *Producción de etanol a partir de harina de yuca en un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea. Ethanol production from cassava flour in simultaneous enzymatic hydrolysis and fermentation.* Dyna. pp. 169.
- Rani, P., Sharma, S., Garg, F., Raj, K., & Wati, L. (2010). *Ethanol production from potato flour by Saccharomyces cerevisiae.* Indian Journal of Science and Technology, Vol. 3(7). pp. 733-736.
- Renovables, m. e. e. (2017). *Estudio de la eficiencia de energía eléctrica en la universidad tecnológica de manzanillo (doctoral dissertation, centro de investigación en materiales avanzados).*
- Rojas, C. M., & López, B. E. (2014). *Obtención de bioetanol anhidro utilizando una tobera incorporado a una columna de destilación continúa.* Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, (10), 10-18.

- Salvador, A. R. (2010). *Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles*. Cienc. Exact. Fís. Nat.(Esp), 104(2), 331-345.
- Sánchez, S. S. C., López, W. E. R., & Rojas, M. P. R. (2020). *Caracterización del almidón de sagú (Canna indica) fermentado para la implementación de procesos agroindustriales*. Revista Sistemas de Producción Agroecológicos, 11(2), 23-51.
- Santos Mejia, C. A. (2018). *Optimización probabilística del impacto de los SFCRs en las redes de distribución eléctrica*.
- SIPSA – DANE – *Cálculos Sistemas de Información FNFP-Fedepapa*. 2020.
- Smith, A., (2008). *Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production*. The Plant journal: for cell and molecular biology, Vol. 54(4). pp. 546-58. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18476862> [Accessed March 3, 2013].
- Sosa-Romero, W., Benavides, D., & Pantoja, R. (2016). *Evaluación de biomasa residual de papa (Solanum tuberosum) como sustrato para la producción de etanol hidratado/evaluation of residual biomass of potato (solanum tuberosum) as substrate for hydrated ethanol production*. Vitae, 23, S643.
- Srichuwong, S., Orikasa, T., Matsuki, J., Shiina, T., Kobayashi, T., & Tokuyasu, K. (2012). *Sweet potato having a low temperature-gelatinizing starch as a promising feedstock for bioethanol production*. Biomass and Bioenergy, Vol. 39. pp. 120-127.
- Suárez, Y. R., Mesa, Y. M., & Barrueta, M. A. (2020). *Una visión sobre el empleo de mezclas etanol-gasolina en motores de combustión interna*. Anuario Ciencia en la UNAH, 18(3).
- Tasic, M., Konstantinovic, B., Lazic, M. & Veljkovic, V. (2009). *The acid hydrolysis of potato tuber mash in bioethanol production*. Biochemical engineering journal, Vol. 43(2). pp. 208-211.

- Tasic, M., & Veljkovic, V. (2011). *Simulation of fuel ethanol production from potato tubers*. Computers & Chemical Engineering, Vol. 35(11). pp. 2284-2293.
- Torroba, A., & Brenes Porras, C. (2022). *Estado de los biocombustibles líquidos en las Américas*.
- Torroba, A., & Carvalho, A. (2020). *Atlas de los biocombustibles líquidos*. Interamerican Institute for Agriculture Cooperation: San Jose, CA, USA.
- Torroba, A., & Productivo, D. (2021). *Atlas de los biocombustibles líquidos 2020-2021*.
- Valdez, H. M. B., Colimba, M. J. B., Caicedo, D. F. C., & Pantoja, P. A. O. (2019). *Generación de un biocombustible, producto de la cáscara de naranja y papa*. Boletín Informativo CEI, 6(1), 89-96.
- Vazirzadeh, M. & Robati, R. (2013). *Investigation of bio-ethanol Production from Waste Potatoes*, Vol. 4(1). pp.104-106.
- Vázquez, H. & Dacosta, O. (2007). *Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas*. INGENIERÍA Investigación y Tecnología VIII. 4. 249-259. pp. 11.
- Vásquez Ruiz, S. M. (2019). *Obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica presente en la cascarilla del arroz para ser utilizados en equipos motorizados (Bachelor's thesis)*.
- Zhang, L., Zhao, H., Gan, M., Jin, Y., Gao, X., Chen, Q. & Wang, Z. (2011). *Application of simultaneous saccharification and fermentation (SSF) from viscosity reducing of raw sweet potato for bioethanol production at laboratory, pilot and industrial scales*. Bioresource technology, Vol. 102(6). pp. 4573-4579.