

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

El arroz es uno de los principales productos de cultivos transitorios en Bolivia debido a la gran extensión de sembradíos que abarca, el cual se considera como uno de los alimentos básicos dentro de la dieta diaria de la mayoría de la población boliviana, urbana y rural, tanto en hogares de ingresos elevados como en los de condición humilde, esto por su alto contenido de nutrientes (EDUCA, 2021).

Según datos del Instituto Nacional de Estadística INE (2020), dan a conocer que la producción de arroz en cáscara es de 487.427 Toneladas.

En nuestro país se cultivan cerca de 170 mil hectáreas de arroz cada año; en consecuencia, la producción de cascarilla de arroz es abundante, el cual es un recurso natural obtenido en la agricultura como desecho por medio de la generación y acumulación en el descascamiento del arroz mediante peladoras industriales, siendo el arroz un elemento esencial en la alimentación de los habitantes (Rodríguez, Salinas, Ríos & Vargas, 2012).

El arroz (*Oryza sativa*) es una monocotiledónea perteneciente a la familia de las Poáceas, su cultivo comenzó hace casi 10.000 años, en muchas regiones húmedas de Asia tropical y subtropical.

Posiblemente la India, sea el país donde se cultivó por primera vez el arroz debido a que en ella abundaban los arroces silvestres. Pero el desarrollo del cultivo tuvo lugar en China, desde sus tierras bajas a sus tierras altas. Probablemente hubo varias rutas por las cuales se introdujeron los arroces de Asia a otras partes del mundo (Acevedo, Castrillo & Belmonte, 2006).

En Bolivia, aunque no existe unanimidad entre los investigadores, se tiene suficientes indicios de que su cultivo fue introducido por colonizadores y misioneros, entre los siglos XVI y XVII, específicamente en la región del Gran Mojo o Paitití, hacia el norte de Santa Cruz.

Las zonas potenciales de cultivo de arroz se presentan en siete departamentos de Bolivia (Oruro y Potosí, son la excepción), siendo Beni, Santa Cruz, La Paz y Cochabamba las zonas que la explotan para venta comercial intensiva, quedando los demás departamentos, como zonas de producción dispersa, particularmente para consumo (MDPyEP, 2014).

Los principales productores son Santa Cruz (60%) y Beni (29%), que en conjunto constituyen el 89% de la producción total de arroz en Bolivia.

Al existir una gran producción anual de arroz en cáscara, se obtiene una considerable cantidad de cascarilla de forma conjunta. La cascarilla de arroz está entre uno de los residuos agroindustriales vegetales significativos. Teniendo en cuenta que una pequeña parte de este porcentaje se utiliza como fertilizante, en algunas ocasiones para la cama de aves, es empleada en criaderos de animales, la cual genera contaminación hacia el medio ambiente por acumulación de desecho de cascarilla y en algunos ingenios sirve como combustible para las secadoras (en los ingenios de La Paz), no obstante; una gran cantidad de la cascarilla de arroz es quemada, generando contaminación hacia el medio ambiente, además de provocar problemas respiratorios en los habitantes de zonas aledañas a las empresas arroceras.

Por esta razón, surge la necesidad de encontrar una aplicación práctica para estos residuos agrícolas para darles un valor agregado, siendo una de las más atractivas en el mercado actual la generación de etanol o bioetanol, debido al amplio uso que se le da al mismo.

El bioetanol como combustible alternativo a fuentes fósiles es uno de los campos en auge en nuestros tiempos, debido a la baja emisión de gases de combustión y fácil obtención del mismo, además, en la industria química su uso es abundante: disolventes industriales, pinturas, perfumes, entre otros (Pedro, 2023).

El bioetanol cuenta con la ventaja de ser un biocombustible que puede sustituir a los combustibles derivados del petróleo, disminuyendo en gran medida las emisiones de

gases perjudiciales para el medio ambiente. Además, puede ser producido a partir de un gran número de materias primas.

En la actualidad, los esfuerzos combinados de profesionales en diversas áreas, buscan un sustituto eficiente que permita reemplazar el uso de combustibles fósiles. La bioenergía surge como una alternativa para lograr este fin. Además, posee múltiples características, tales como favorecer a la variación de la energía en los países, reduce la cantidad de emisiones de gases contaminantes, ayuda a la generación de empleos en el área rural y sustituir de la importación de los combustibles (Cuervo, Folch, Quiroz, 2014).

El uso de bioetanol inició en Brasil en el año 1925 seguido por Alemania y Francia en el año 1984 y a partir del siglo XX fue ampliamente utilizado en Europa y Estados Unidos, después de la segunda guerra mundial. Pero el uso de este combustible tuvo un declive por los altos costos que significaba su obtención en comparación con generar combustible a partir del petróleo.

Hasta la década de 1970 en donde se dio la crisis del petróleo fue que el etanol se estableció como un combustible alternativo, varios países comenzaron programas para estudiar y desarrollar una producción de combustible más económica a partir de las materias primas disponibles. El bioetanol fue declarado como una fuente de energía renovable prometedora, con mejores características que los combustibles tradicionales a base de petróleo (es decir, con un índice alto de octano y alto calor de vaporización), por lo que las naciones del mundo fueron impulsadas a expandir el uso y producción de bioetanol (Khattab & Watanabe, 2019).

El Instituto Boliviano de Comercio Exterior en el año 2008 nos indica que los biocombustibles líquidos más utilizados a nivel mundial son el bioetanol y el biodiésel, para emplearse en motores a explosión y a compresión, respectivamente. En este sentido actualmente existen políticas de comercialización, estandarización y fomento a la producción de los mencionados combustibles. (IBCE, 2008).

Existen antecedentes de investigaciones realizadas sobre la utilización de cascarilla de arroz en la producción de bioetanol, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

Dagnino, Chamorro, Felissia & Area (2014), en su investigación “Obtención de Bioetanol a partir de la celulosa presente en Cascarilla de Arroz y Aserrín de Algarrobo”, somete estos residuos a un pretratamiento ácido, hidrólisis enzimática y fermentación. En sus resultados, el rendimiento luego de la fermentación fue del 55% aproximadamente en ambos casos. Pudo comprobarse que es necesaria una etapa de pretratamiento para aumentar la accesibilidad de las enzimas en la etapa de hidrólisis.

Arismendy, Villa, Alcaraz, Chamorro & Área (2019), en su investigación “Optimización de la hidrólisis enzimática de la cascarilla de arroz”, se realizó mediante un pretratamiento alcalino, una hidrólisis enzimática y fermentación simultáneas, se obtuvo un máximo de rendimiento del 65%.

Sánchez & Fajardo (2018), en su trabajo de investigación “Obtención de bioetanol de segunda generación (2G) a partir de cáscara de arroz. Una propuesta pro ambiental”, realiza un pretratamiento alcalino de la cascarilla de arroz posteriormente realizó el proceso de hidrólisis enzimática para luego llevar los líquidos hidrolizados a fermentación, donde el mayor rendimiento de etanol fue de 19,94%.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Producir Bioetanol a partir de cascarilla de arroz mediante hidrólisis enzimática, para contribuir al estudio de nuevas materias primas en la producción de bioetanol dentro de nuestro país.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima para conocer sus propiedades, mediante un análisis fisicoquímico.

- Seleccionar el proceso para la obtención de Bioetanol a partir de cascarilla de Arroz, mediante matrices de decisión, analizando y comparando los procesos existentes para el mismo.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del bioetanol obtenido para poder determinar la calidad del producto final, mediante análisis fisicoquímico.

JUSTIFICACIÓN

Justificación Ambiental

La producción agrícola del arroz en nuestro país genera grandes cantidades de cascarilla de arroz, lo cual plantea riesgos para la salud humana y el medio ambiente si no se gestionan de manera adecuada. Actualmente, muchos de estos residuos son quemados o depositados en vertederos al aire libre, lo que provoca un gran impacto ambiental.

La producción de bioetanol a partir de la cascarilla de arroz es una alternativa para darle un nuevo uso a estos residuos, además de reducir significativamente los volúmenes de los mismos siendo una gran opción a la hora de crear una energía alternativa, la cual produce menor cantidad de emisiones al ambiente en comparación con los combustibles fósiles, que son los más usados actualmente.

Justificación Técnica

El aprovechamiento de residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales, se plantea el uso de la cascarilla de arroz, la cual es rica en polímeros de celulosa y hemicelulosa, los cuales mediante procesos, físicos, químicos o biológicos se pueden convertir fácilmente en bioetanol haciendo uso de tecnología existente, siendo una alternativa energética para proteger el ambiente, preservar recursos renovables, no renovables y maximizar el uso potencial de subproductos agrícolas que hay en el país.

Justificación Económica

El aprovechamiento de los residuos agroindustriales, como la cascarilla de arroz, es una estrategia altamente efectiva para convertir este subproducto en una valiosa fuente de materia prima renovable en la producción de bioetanol.

Esta práctica ofrece beneficios económicos, otorgando un valor agregado a la cascarilla, que de otra manera sería considerada como un desecho. Esto abre oportunidades económicas a mediana y gran escala para la producción de bioetanol, lo que permitirá generar ingresos adicionales a los productores de arroz en nuestro país.

Justificación Social

Es de gran importancia para los agricultores de arroz, tener la oportunidad de aprovechar los residuos generados durante la producción de este cereal. La utilización de los residuos para obtener bioetanol, generará ingresos económicos adicionales para los productores de arroz y a su vez contribuirá a la disposición adecuada de los residuos generados reduciendo el impacto ambiental que provocan.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. Breve reseña del Cultivo del Arroz

Existen varias versiones sobre el origen del arroz, pero se tiene constancia que su cultivo se inició en Asia, en concreto, entre India y China, hace unos 10.000 años. Posteriormente pasó a Tailandia hace unos 5.000 años. Más tarde se expandió a Vietnam, Camboya, Japón y Corea (Toussaint-Samat, 2008).

El arroz, forma parte de un grupo de 19 especies de hierbas anuales de la familia de las Gramíneas, aunque es el arroz común (*Oryza sativa*) la única especie importante para el consumo humano (Acevedo, Castrillo & Belmonte, 2006).

1.2. El Arroz

El arroz es una planta gramínea que pertenece a la familia de las Poáceas, es uno de los principales alimentos básicos en muchos continentes como Asia y América Latina. Constituye el segundo alimento más utilizado del mundo después del trigo y es el primero en Asia.

Naciones de grandes poblaciones como China o la India basan fundamentalmente su alimentación en este alimento. Podemos decir entonces que casi la mitad de la población mundial depende de este cereal (Rodríguez, 2016).

El arroz es un cultivo milenario cuya base productiva es el trabajo, agua y tierra, convirtiéndose de esta manera en el alimento más importante para la tercera parte de la población mundial, al ser el único cereal que se destina únicamente a la alimentación humana, debido a que es rico en vitaminas, sales minerales, bajo en contenido graso, sodio y libre de colesterol (FAO, 2003).

Figura 1-1: El Arroz

Fuente: FAO (2003).

Tabla I-1: Composición del grano de arroz y sus fracciones

Componente %	Arroz Cáscara	Cascarilla
Proteína	6.7 - 8.3	2.3 - 3.2
Lípidos	2.1 - 2.7	0.4 - 0.7
Fibra Cruda	8.4 - 12.1	40.1 - 53.4
Cenizas	3.4 - 6.0	15.3 - 24.4
Almidón	62.1	1.8
Fibra dietaria	19.2	2.7

Fuente: Torres (2018).

1.3.Taxonomía del Arroz

El arroz es una monocotiledónea perteneciente a la familia de las Poáceas. En la siguiente tabla se describe la taxonomía completa del arroz.

Tabla I-2. Clasificación taxonómica del arroz

CATEGORÍA	TAXÓN
Nombre científico	Oryza sativa L.
Nombre vulgar	Arroz
Clase	Monocotiledonea
Orden	Gumiflora
Familia	Graminea
Subfamilia	Panicoldeaes
Género	Oriza
Tipo	Espermatofita
Subtipo	Angiosperma

Fuente: Ruíz (2005).

1.4.Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz es un subproducto generado del proceso de molienda del grano de arroz, tiene varias aplicaciones, entre las principales están la conversión de biomasa y la elaboración de abonos. La cascarilla se encuentra en la parte exterior del grano de arroz maduro, y no es apta para el consumo humano debido a su elevado contenido de sílice (Vargas, Alvarado, Vega y Porras, 2013).

La cáscara de arroz representa del 20% al 25% del peso total del arroz, su amplia disponibilidad y bajo costo la vuelve una materia prima potencial para diversas aplicaciones (Yu, Zhang, He, Liu y Yu, 2008).

La cascarilla de arroz es una fibra corta que recubre naturalmente el grano para protegerlo del ambiente; es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular.

La cascarilla es denominada material de desecho lignocelulósico. Ésta no posee el almidón presente en la semilla, sin embargo, posee tres moléculas importantes, lignina, celulosa y hemicelulosa, las cuales poseen las mismas características que el almidón para producir etanol.

Las cantidades presentes en la cascarilla del arroz son las siguientes, Celulosa (36-45%), Lignina (18-24%) y Hemicelulosa (11-27%).

Debido a las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz (celulosa, lignina, hemicelulosa y humedad) resulta lenta su biodegradación lo que le atribuye a ser un desecho altamente contaminante en especial para las fuentes de agua (Aguilar, 2009).

Figura 1-2: Cascarilla de Arroz



Fuente: Aguilar (2009).

Tabla I-3: Valores de los principales constituyentes de la cascarilla de arroz

Constituyente	Contenido %
Proteína Cruda, Nx6.25	1.9 - 3.0
Grasa Cruda	0.3 - 0.8
Fibra Cruda	34.5 - 45.9
Carbohidratos	26.5 - 29.8
Cenizas	13.2 - 21.0
Sílice	18.8 - 22.3
Calcio	0.6 - 1.3
Fósforo	0.3 - 0.7
Lignina	9.0 - 20.0
Celulosa	28.0 - 36.0
Pentosas	21.0 - 22.0
Hemicelulosas	12
Nutrientes digeribles totales	9.3 - 9.5

Fuente: Vargas, Alvarado, Vega-Baudrit, Porras (2013).

1.5. Producción y comercialización mundial del Arroz

El arroz es la base de la alimentación de la mitad de la población mundial y el tercer cereal más producido en el planeta después del maíz y el trigo. Sin embargo, es el primero en términos de consumo humano ya que casi la totalidad del arroz producido se destina al consumo directo, mientras que gran parte del maíz es utilizado en la alimentación animal y biocombustibles, entre otros.

Otra característica del arroz es su fuerte concentración en las regiones asiáticas, donde se produce y se consume casi el 90 % de este cereal en el mundo. De los 756 millones de toneladas de arroz (MMt) con cáscara producidas en 2019, aproximadamente 680 MMt fueron cosechadas en Asia (Tabla I-4).

Tabla I-4: Producción, comercio y consumo mundial de cereales en millones de toneladas (MMt) y porcentaje (%) en 2019

Cereal	Producción	%	Área	Rendimiento	Comercio	%	Consumo	%
Maíz	1.112	38	194	6	170	37	1.120	42
Arroz*	756	26	163	4,638	44	10	505	19
Trigo	762	26	215	3544	188	41	740	28
Otros Cereales	310	11	142	2183	55	12	325	12
Total	2.940	100	714	4.118	457	100	2.690	100

*Producción de arroz cáscara, comercio y consumo arroz pulido.

Fuente: FAO (2020) y USDA FAS (2020).

1.6. Principales países productores

China, India e Indonesia son los tres principales productores de arroz en el mundo, representando un 60% de la producción total. Otra de las particularidades del arroz es que una pequeña proporción (9%) de la producción se destina al comercio internacional, mientras que el comercio del trigo y maíz representa el 22% y el 14% de la producción, respectivamente. Esto significa que los principales productores de arroz son también los principales consumidores (Ver tabla I-5).

Tabla I-5: Producción, comercio y consumo de arroz blanco por región, en millones de toneladas (MMt) y porcentaje (%) en la temporada 2018/19.

Regiones	Producción (MMt)	%	Importaciones	%	Exportaciones	%	Consumo	%
Asia	451,0	89,0	12,8	29,0	36,0	82,0	427,0	85,0
China	145,0	29,0	3,8	9,0	2,8	6,0	147,0	29,0
India	116,0	23,0	0,1	0,0	9,8	22,0	103,0	20,0
Indonesia	47,0	9,0	0,4	1,0	0,0	0,0	38,0	8,0
Américas	26,0	5,0	5,7	13,0	6,7	15,0	24,0	5,0
Latinoamérica	19,0	4,0	4,2	10,0	3,6	8,0	19,0	4,0
Sudamérica	17,0	3,0	1,8	4,0	3,5	8,0	15,0	3,0
Centroamérica & Caribe	2,0	0,0	2,4	5,0	0,1	0,0	4,0	1,0
Norteamérica	7,0	1,0	1,5	3,0	3,1	7,0	5,0	1,0
África Subsahariana	18,0	4,0	16,0	36,0	0,4	1,0	34,0	7,0
Oriente Medio	7,0	1,0	6,1	14,0	0,5	1,0	12,0	2,0
Europa & Oceanía	3,0	1,0	3,5	8,0	0,5	1,0	5,0	1,0
Mundo	506,0	100,0	44,1	100,0	44,1	100,0	503,0	100,0

Fuente: FAO (2020).

1.7. Producción de Arroz en Bolivia

En Bolivia el arroz se introdujo a nuestras comunidades indígenas en los siglos XVII y XVIII por los colonizadores españoles y misioneros jesuitas, por lo que podemos resaltar que este cultivo no es originario de esta región.

Los colonizadores nacionales cultivan el 29,73 % de la superficie total de arroz de la región y representan el 88,08% del total de productores, con una superficie promedio de 16,25 ha. Los colonos extranjeros (japoneses y menonitas) siembran el 26,4% de la superficie de arroz, con un promedio de 371,94 ha; los empresarios agrícolas cruceños participan con el 40,5%, con un promedio de 689,85 ha cultivadas. Las comunidades indígenas cultivan el 3,37% y un promedio de 6 ha.

El volumen promedio de la producción de arroz de los pequeños productores nacionales de la región es de 98.081,2 toneladas, de ellas, aproximadamente el 94% es generado por esta región productora, su destino principal es el mercado local a través de ventas directas a los intermediarios, representados por los ingenios arroceros de la región.

Tabla I-6: Producción de Arroz (TM)

Departamento	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Chuquisaca	394	379	393	396	456	465	391	392	388	410
La Paz	9.604	9.873	10.203	12.354	14.723	15.061	12.550	13.315	13.961	14.575
Cochabamba	8.350	8.824	8.984	9.288	10.277	10.497	9.761	10.513	11.509	11.906
Tarija	614	624	629	646	788	606	730	713	730	726
Santa Cruz	380.281	386.843	402.323	403.312	439.232	317.340	351.599	409.297	432.430	350.863
Beni	41.276	48.705	50.872	54.816	58.458	59.519	99.886	103.088	137.073	105.232
Panto	3.076	3.045	3.111	3.245	3.407	3.489	3.661	3.839	3.954	3.715
Total	443595	458293	476515	484057	527341	406977	478578	541157	600045	487427

Fuente: Revista Industrial 4.0 (2022).

1.8. Biomasa Lignocelulósica

La materia orgánica contiene biomasa, por lo que en el mundo se llevan a cabo diversas investigaciones para desarrollar la producción a gran escala de etanol a partir de esta biomasa lignocelulósica (Perez, 2013).

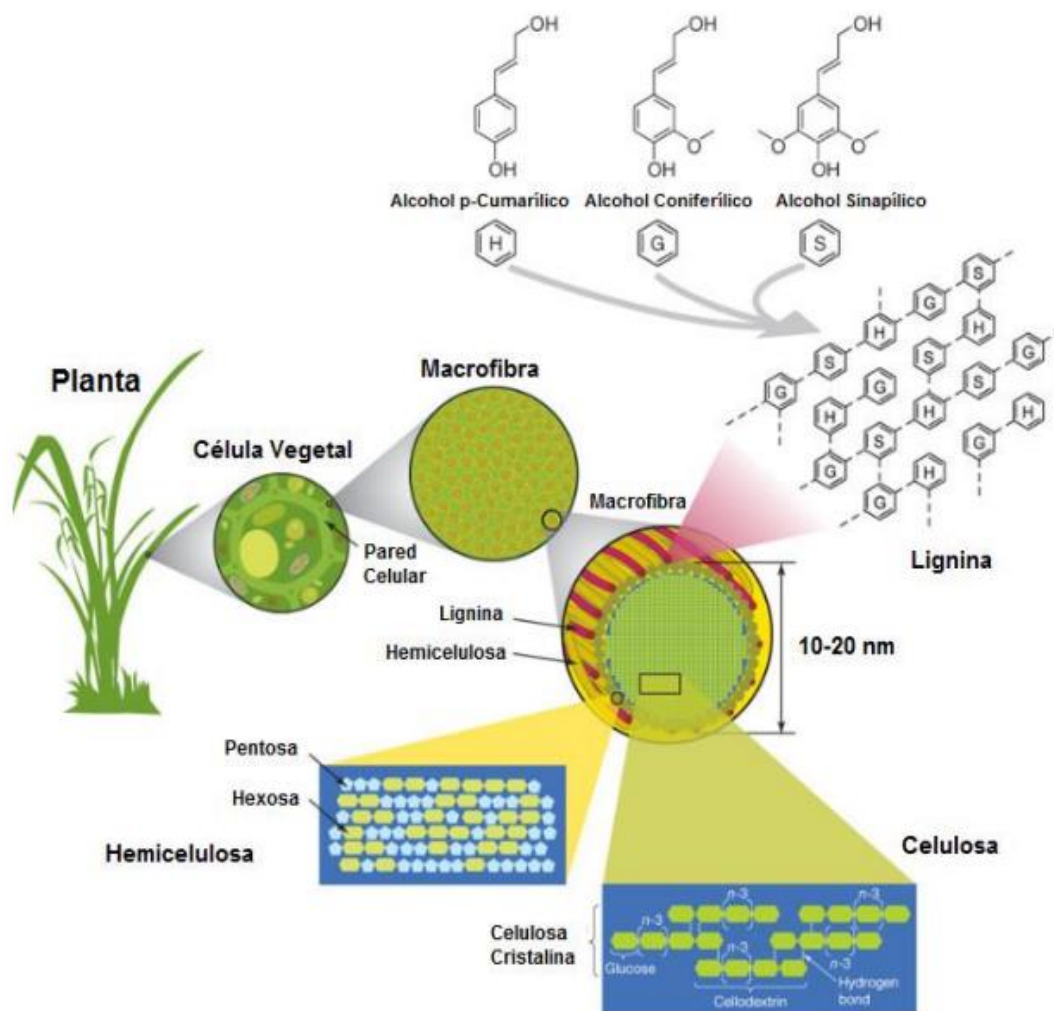
La lignocelulosa es insoluble en agua, por lo que se requiere alterar su estructura para tener contacto directo entre las enzimas y el sustrato (Chang y Holtzaple, 2000).

La lignocelulosa es el componente principal de las paredes de la célula vegetal, cuenta con tres componentes principales en sus paredes celulares: celulosa, hemicelulosa y lignina (Chang y Holtzaple, 2000).

El componente principal de la lignocelulosa es la celulosa, la cual es una cadena de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos; los enlaces de hidrógeno entre las diferentes capas de los polisacáridos contribuyen a la resistencia de la celulosa cristalina a la degradación. La hemicelulosa es el segundo componente más abundante de la lignocelulosa. La lignina se compone de tres componentes fenólicos principales, y se sintetiza por polimerización de estos componentes. La celulosa, hemicelulosa y lignina forman estructuras llamadas microfibrillas, que se organizan en macrofibrillas que median la estabilidad estructural en la planta de la pared celular (Rubin, 2008).

Para un mejor entendimiento de lo que es la biomasa lignocelulósica y poder aprovecharla, se deben conocer cuáles son los componentes principales de las paredes celulares y estos a su vez, se pueden dividir en tres fracciones orgánicas con las siguientes composiciones representativas en peso seco: 20% -50% de celulosa, 15% -35% de hemicelulosa y 10% -30% de lignina. Además, contiene cantidades más pequeñas de otros componentes minoritarios; proteínas (3-10%), lípidos (1,5%), extractivos y minerales (10,5%), que en los análisis químicos se estiman como cenizas (Morales de la Rosa, 2015).

Figura 1-3: Estructura de la Biomasa Lignocelulósica.



Fuente: Morales de la Rosa (2015).

1.8.1. Celulosa

La celulosa constituye entre el 35% y 50% del peso seco de las plantas, es la fuente de carbono renovable más abundante de la Tierra. Sin embargo, presenta una barrera física y química para acceder al carbono, lo que ha limitado el aprovechamiento del mismo (Gutiérrez, Moreno y Montoya, 2014).

1.8.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa está compuesta por polímeros de diferentes azúcares con cadenas más cortas y ramificadas, lo que la hace más amorfa y más fácil de hidrolizar en sus azúcares constituyentes que la celulosa. En estado natural consigue tener un grado de polimerización que no excede a los 200 monómeros. Su papel es suministrar la unión entre la lignina y la celulosa para proporcionar rigidez a la pared celular y son insolubles en agua (Gutiérrez, Moreno y Montoya, 2014).

1.8.3. Lignina

La lignina se encuentra en la biomasa entre un 10 y 30 % dependiendo de la especie vegetal. Detrás de celulosa y hemicelulosa, es el tercer biopolímero más abundante en la Tierra. Se encuentra principalmente en la lámina media de la pared celular y en las capas de la pared celular formando junto con la hemicelulosa una matriz alrededor de las microfibras de la celulosa.

Es un heteropolímero amorfo formado por alcoholes aromáticos que dan soporte estructural, rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y es altamente resistente a la degradación química y biológica (Arellano, 2015).

1.9. Uso de cáscaras de arroz en la industria

La cáscara de arroz es un residuo orgánico, se encuentra en grandes cantidades en las fábricas donde procesan el cereal, es considerado como el principal subproducto representando al 20% de la cosecha en la producción de arroz.

Hace muchos años atrás, las cáscaras de arroz fueron consideradas como desechos, donde su utilización era mínima por lo que se procedía a quemarlas o enterrarlas. Al quemarlas se contribuía a una contaminación ambiental.

En los últimos años esto ha ido cambiando pues se ha descubierto nuevas maneras de utilizar estos desechos agroindustriales lignocelulósicos en formulaciones alimenticias para los animales, también en la producción de fertilizantes, biocombustibles, fuente de sílice entre otros. La desventaja es que cuenta con ciertas limitaciones como en lo alimenticio por ser un producto de poca digestibilidad, para la producción de fertilizantes las limitaciones se dan por el contenido de celulosa y lignina que presentan estos desechos.

1.10. Biocombustibles

Biocombustible es el término dado a un combustible que viene de biomasa, desechos orgánicos y organismos vivos entre otros.

Los biocombustibles son productos químicos enriquecidos con energía producidos a partir de la biomasa que se encuentra en abundancia en la naturaleza, como resultado de la fotosíntesis que convierte el dióxido de carbono atmosférico en azúcar, mediante el uso de energía solar y agua (Darda, Papalas, Zabaniotou, 2018).

Este tipo de combustible nace como alternativa a los combustibles fósiles convencionales, los cuales, hoy en día son los más utilizados y son los mayores productores de emisiones tóxicas sobre el aire. Los biocombustibles son una gran alternativa al disminuir casi en un 50% estas emisiones, disminuyendo con esto las concentraciones elevadas de gases en la atmósfera. Los más utilizados son el biodiesel y el bioetanol.

El bioetanol es obtenido principalmente por fermentación de los azúcares presentes en la biomasa. El biodiesel es obtenido a partir de aceites vegetales.

A lo largo de la historia, la humanidad ha conocido diferentes tipos de biocombustibles, el primer combustible usado por el hombre fue de este tipo (la madera). Estos son de

gran importancia pues podrían ayudar a disminuir la cantidad de desechos depositados sobre la atmósfera, haciendo que el efecto invernadero no tenga las mismas implicaciones que tiene en este momento y disminuyendo la temperatura terrestre evitando que siga aumentando.

1.10.1. Biocombustibles de Primera generación

Se denomina combustible de primera generación cuando su obtención se la realiza a partir de carbohidratos de origen vegetal como la sacarosa o de polímeros simples como el almidón (Zamora, Hernández, 2014).

La mayoría de los biocombustibles de primera generación provienen de cultivos como moléculas de azúcares, aceites y almidón (Aro, 2016). El proceso se utiliza para obtener bioetanol a partir de esta materia prima es la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios orgánicos). La ventaja de estos biocombustibles es su versatilidad de procesamiento y sus reducidas emisiones de gases de efecto invernadero (Maciel, 2009).

1.10.2. Biocombustibles de Segunda Generación

Se denomina combustibles de segunda generación cuando la obtención de etanol se origina a partir de polímeros de carbohidratos complejos como la hemicelulosa y celulosa (Zamora, Hernández, 2014).

Los biocombustibles de segunda generación son elaborados a partir de residuos o material celulósico, estos biocombustibles tienen una ventaja considerable en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, costos y aceptabilidad social en comparación con los biocombustibles de primera generación (Mitkidis, Magoutas, Kitsios, 2017).

1.11. Bioetanol

El bioetanol es considerado como el biocombustible más importante que se obtiene a partir de recursos renovables.

El etanol (C_2H_5OH) es un líquido inflamable e incoloro que se obtiene a partir de tres tipos de materia prima: los productos ricos en sacarosa como la caña de azúcar, la melaza y el sorgo dulce; las fuentes ricas en almidón como cereales (maíz) y tubérculos (yuca); y mediante materiales ricos en celulosa como la madera y los residuos agrícolas, posee un alto octanaje y una mayor solubilidad en gasolina que el metanol.

El etanol tiene tres funciones principales: para usarse como combustible, en la industria y para bebidas alcohólicas. El uso como combustible representa el 61% de la producción mundial, ya sea para mezclar o reemplazar petróleo y derivados, alrededor del 23% se destina a la industria procesadora (cosméticos, farmacéutica, química, entre otras), y el 16% restante se destina a la industria de bebidas.

Tabla I-7: Propiedades físicas y termodinámicas del etanol

Fórmula molecular	C_2H_5OH
Punto de ebullición	78,3 °C
Punto de fusión	- 130 °C
Punto de congelación	-114,1 °C
Punto de inflamación	12 °C
Temperatura de autoignición	793 °C
Calor específico	2,42 J/g °C (a 20 °C)
Calor de combustión	29677,69 J/g (a 20°C)
Calor de fusión	104,6 J/g
Calor de vaporización	839,31 J/g
Densidad	0,78983 (a 20 °C)
Viscosidad	1,17 cp (a 20 °C)
Conductividad térmica	0,17 W/m K (a 20 °C)
Presión crítica	63,116 atm
Temperatura crítica	243,1 °C
Volumen crítico	0,167 l/mol
Solubilidad	agua, éter, metanol, cloroformo, acetona

Fuente: Wikipedia (2023).

La graduación alcohólica se determina mediante el dispositivo denominado alcoholímetro de Gay Lussac (°G.L), donde la graduación 0 ° corresponde al agua pura y 100 ° al alcohol absoluto (Andrade, 2018).

En nuestro país los tipos de etanol reciben las siguientes denominaciones:

- Alcohol medicinal desinfectante de 68° a 72° G.L.
- Alcohol de quemar de 83° a 85 °G.L.
- Alcohol rectificado de 96 °G.L.
- Alcohol neutro, rectificado, extrafino, potable o sin desnaturalizar de 96° G.L.
- Alcohol carburante mínimamente de 99 °G.L., llamado también absoluto, desnaturalizado.

El etanol cualquiera que fuera su origen es un combustible, es decir, libera significativas cantidades de calor al quemarse, es uno de los biocombustibles más empleados a nivel mundial (Andrade, 2018).

1.12. Usos del Bioetanol

El Bioetanol se ha convertido en una solución versátil y sostenible para diversas aplicaciones en diferentes sectores. Desde su uso como combustible para vehículos hasta su aplicación en la industria química, pasando por su contribución a la generación de energía eléctrica y la producción de materiales sustentables, el bioetanol demuestra su potencial para impulsar un futuro más limpio y respetuoso con el medio ambiente (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.1. Combustible para transporte

Una de las aplicaciones más extendidas del bioetanol es su uso como combustible para vehículos. Mezclado con gasolina en diferentes proporciones, el bioetanol puede utilizarse como aditivo o sustituto parcial de los combustibles fósiles. Esto no solo reduce las emisiones de gases contaminantes, sino que también disminuye la dependencia de los recursos no renovables (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.2. Energía Eléctrica y cogeneración

El bioetanol también se utiliza para la generación de energía eléctrica y cogeneración. Mediante su combustión en plantas de energía, se produce vapor que impulsa turbinas para generar electricidad. Además, el calor residual resultante se aprovecha para fines industriales o domésticos, lo que aumenta la eficiencia energética (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.3. Industria Química

El bioetanol es una materia prima importante en la industria química. Se utiliza como disolvente en la producción de productos farmacéuticos, cosméticos, productos de limpieza y pinturas. Además, el bioetanol se utiliza como precursor en la síntesis de una variedad de compuestos químicos, como ésteres, éteres y aldehídos (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.4. Bioplásticos y Materiales Sustentables

El bioetanol se utiliza en la producción de bioplásticos, una alternativa sostenible a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Estos bioplásticos tienen aplicaciones en diversas industrias, como embalajes, textiles, electrónica y automoción. Además, el bioetanol se emplea en la producción de materiales de construcción ecológicos, como adhesivos y aglomerantes (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.5. Alimentos y Bebidas

En la industria alimentaria, el bioetanol se utiliza como solvente en la extracción de compuestos y aromas de alimentos y plantas (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.6. Combustible Doméstico y Calefacción

El bioetanol también se emplea como combustible para uso doméstico. Chimeneas, estufas y calentadores pueden funcionar con bioetanol, brindando calor y ambiente sin las emisiones nocivas asociadas con los combustibles fósiles. Estas opciones de

calefacción son especialmente populares en áreas donde no se dispone de acceso a la red eléctrica o el gas natural (Bioethanol for fireplaces, 2023).

1.12.7. Desinfectante

Se emplea tópicamente sobre la piel como antiséptico a una concentración del 70% p/v. Se emplea en desinfección de la piel antes de las inyecciones cutáneas, en extracciones sanguíneas y en la desinfección de jeringas y termómetros clínicos (González, 2018).

1.13. Conversión de la Biomasa Lignocelulósica a Bioetanol

La dificultad de convertir los materiales lignocelulósicos en productos biocombustibles se debe a sus características morfológicas, la lignina y la hemicelulosa actúan como una barrera natural (Dagnino, Chamorro, Romano, Felissia y Area, 2011).

Para llevar a cabo la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos es necesario la aplicación de etapas previas para así garantizar la obtención de azúcares fermentables listos para el proceso de fermentación.

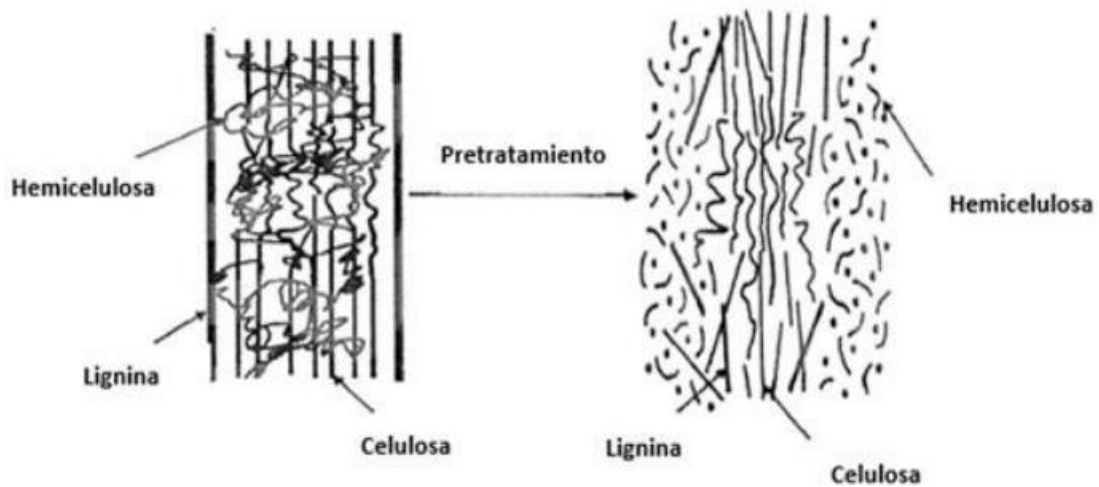
Para lograr una conversión del material lignocelulósico a bioetanol, es necesario someterlo a 3 procesos que son: pretratamiento, hidrólisis y fermentación (Dagnino, Chamorro, Romano, Felissia y Area, 2011).

1.14. Pretratamiento

La aplicación del proceso de pretratamiento tiene el propósito de modificar las propiedades tanto físicas como químicas del material lignocelulósico, de esta manera se origina la remoción de la lignina, permitiendo el acceso de las enzimas a la celulosa y hemicelulosa para facilitar la hidrólisis enzimática y obtener resultados eficientes. Mediante el pretratamiento se puede modificar el estado cristalino de la celulosa, alterar el tamaño y estructura del material. Este proceso puede llevarse a cabo por métodos biológicos, químicos y físicos (Cuervo, Folch y Quiroz, 2009).

De acuerdo con lo reportado por Sakamoto - Takatoshi, 2012, el remanente líquido generado después de un pretratamiento puede ser filtrado para obtener dos fracciones: la parte sólida rica en celulosa y la fracción líquida rica en hemicelulosa conformada por xilosas, glucosas, galactosas y arabinosas.

Figura 1-4: Representación del efecto del pretratamiento sobre el material vegetal



Fuente: Arellano (2015).

1.14.1. Tipos de Pretratamiento

1.14.1.1. Pretratamientos mecánicos.

Consiste principalmente en la reducción de tamaño de la biomasa lignocelulósica. El objetivo de un pretratamiento mecánico es incrementar la superficie de contacto disponible, así como la reducción de la cristalinidad y una reducción del grado de polimerización (Cortes, 2013).

1.14.1.1.1. Trituración Mecánica

Al someter a la biomasa a la reducción de tamaño de partículas esto provoca un aumento de su superficie específica y la reducción del radio de polimerización.

1.14.1.1.2. Ultrasonido

Para este método los resultados sobre la biomasa resultan ser algo superficiales por lo que no se obtienen resultados eficientes.

1.14.1.2. Pretratamientos Térmicos

1.14.1.2.1. Explosión de vapor

Se obtiene una reducción de tamaño con menor gasto energético, la recuperación de la celulosa debido a la despolimerización resulta ser fácil mediante el lavado.

1.14.1.2.2. Agua Caliente líquida presurizada

Este método tiene la ventaja de que existe una baja formación de inhibidores. Consiste en tratar la biomasa con agua caliente, manteniendo su estado líquido. El proceso ocurre en un reactor a presión por un tiempo determinado entre 2,5 y 30,5 minutos, con temperaturas de 180° a 220°C

1.14.1.3. Pretratamientos químicos

Los pretratamientos químicos tienen como objetivo solubilizar la lignina para su remoción y solubilizar la hemicelulosa para poder exponer la celulosa al ácido o a la posterior hidrólisis enzimática (Pereira, 2003).

1.14.1.3.1. Pretratamientos en medio alcalino

Durante el pretratamiento alcalino las primeras reacciones que tienen lugar son la solvatación y saponificación, lo que resulta en un mejor acceso de las enzimas en la celulosa debido a la expansión de la biomasa. En altas concentraciones alcalinas, ocurre una hidrólisis alcalina, lo cual conlleva a la degradación y descomposición de polisacáridos.

Los pretratamientos alcalinos son realizados mediante el uso de bases tales como hidróxido de sodio, potasio, calcio y amonio, los cuales son eficaces en la alteración de la estructura de la lignina. Por lo tanto, aumenta la accesibilidad enzimática a la

celulosa y hemicelulosa, además aumenta el tamaño del poro lo que facilita la difusión de las enzimas hidrolíticas

1.14.1.3.2. Pretratamientos con ácido diluido

El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica con ácidos, ya sean diluidos o fuertes, se realiza para mejorar la digestibilidad anaerobia.

El objetivo es solubilizar la hemicelulosa, y lograr con esto mejor acceso a la celulosa, sin embargo, puede generar compuestos inhibitorios. La principal reacción que se produce durante el pretratamiento ácido es la hidrólisis de la hemicelulosa, especialmente de xilano, que es relativamente estable en ácido. Al someter la hemicelulosa a un pretratamiento ácido, puede ser objeto de las reacciones hidrolíticas y producir furfural, HMF y otros productos (Cortes, 2013).

1.14.1.3.3. Pretratamiento por Oxidación Húmeda

Un pretratamiento oxidativo consiste en la adición de un compuesto oxidante, como el peróxido de hidrógeno o ácido peracético a la biomasa, que está sumergida en el agua. Durante el pretratamiento oxidativo puede tener lugar reacciones como sustitución electrofílica, el desplazamiento de cadenas laterales, rompimientos de vínculos de alquil, aril, éter o de núcleos aromáticos (Hon y Shiraishi, 2001).

1.14.1.4. Pretratamientos biológicos

En este pretratamiento el material lignocelulósico se somete a la acción de enzimas o microorganismos, para poder degradar la lignina y la hemicelulosa, haciéndola más accesible al posterior ataque enzimático (Sánchez, Gutiérrez, Muñoz y Rivera, 2010).

1.14.1.4.1. Tratamiento con hongos

Utiliza microorganismos como hongos de podredumbre marrón, blanco y suave, la podredumbre marrón ataca la celulosa, la podredumbre blanca y suave ataca tanto la celulosa como la lignina. Los hongos más efectivos son los de pudrición blanca (*basidiomicetos*) (Sánchez, Gutierrez, Muñoz & Rivera, 2010).

1.14.1.4.2. Tratamiento con bio-solventes orgánicos

Emplea solventes orgánicos para permitir la acción de hidrólisis en la hemicelulosa y hongos para la descomposición de la red de lignina. Comúnmente se utiliza etanol como solvente y hongos de podredumbre blanca. Las ventajas del pretratamiento biológico son: ahorro de electricidad, el etanol puede ser reutilizado y es amigable con el medio ambiente (Sánchez, Gutierrez, Muñoz & Rivera, 2010).

1.14.2. Ventajas y desventajas de los pretratamientos

PRETRATAMIENTOS MECÁNICOS		
Método	Ventajas	Desventajas
Trituración mecánica	La reducción de tamaño de partículas lleva a un aumento de superficie específica y una reducción del grado de polimerización. (Delgenés, 2003).	A pesar de no producirse inhibidores, la molienda es ideal para la producción de etanol. Sin embargo, esta operación requiere de un alto consumo energético (Cowling y Kirk, 1976).
Ultrasonido		El efecto sobre la biomasa es muy superficial.
PRETRATAMIENTOS TÉRMICOS		
Explosión de vapor	Hidrólisis de 80 al 100% de la hemicelulosa. Alta concentración de sólidos. Reducción del tamaño con menor gasto energético. La lignina inalterada se puede extraer. Grous, (1986) reporta un incremento en la digestibilidad enzimática de la biomasa después de este pretratamiento.	Dstrucción de una parte de los xilanos de las hemicelulosas. Incompleta rotura de la lignina. Se requiere de una etapa de lavado posterior, donde se pueden perder azúcares y existe una posible formación de inhibidores de fermentación.

<p>Agua caliente líquida presurizada</p>	<p>Se recuperan la mayoría de las pentosas.</p> <p>Hidrólisis de la hemicelulosa de 80 - 100%.</p> <p>Baja o nula formación de inhibidores.</p> <p>Respecto al pretratamiento con vapor, este tiene la ventaja de solubilizar productos de hemicelulosa y lignina en concentraciones más bajas.</p>	<p>Debido a las bajas concentraciones se reduce el riesgo de degradación de productos como furfural y la condensación y la precipitación de compuestos de lignina (Hendriks y Zeeman, 2009).</p>
PRETRATAMIENTOS QUÍMICOS		
<p>En medio Ácido</p>	<p>Ácidos concentrados: se obtienen rendimientos de hidrólisis superiores al 90%.</p> <p>Ácidos diluidos: bajo consumo de ácidos; hidrólisis del 80 al 100% de la hemicelulosa; la T° alta favorece la hidrólisis de la celulosa.</p>	<p>Ácidos concentrados: la gran cantidad de ácido requerido; los costos de la recuperación del ácido; los efectos corrosivos de los ácidos concentrados que conllevan a altas inversiones en los equipamientos; es necesaria una costosa etapa de neutralización antes de la fermentación (Keller, 1996). Existe el riesgo de formación de inhibidores.</p> <p>Ácidos diluidos: Requiere altas temperaturas para alcanzar rendimientos aceptables de conversión de celulosa a glucosa; a pesar de las T° altas y tiempos de residencia cortos que generan máximos rendimientos en</p>

		glucosa, tan solo han logrado el 60% en torno al rendimiento teórico.
En medio Alcalino	Aumento del área superficial interna. Descenso del nivel de cristalización. Separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos. Rotura de la estructura de la lignina.	El pretratamiento alcalino causa la solubilización de hemicelulosa y lignina. Existe a menudo una pérdida de productos en la degradación de hemicelulosa y la solubilización.
Oxidación Húmeda	Este tratamiento tiene la ventaja de no generar prácticamente productos de degradación como el furfural, y HMF (Klinke, 2002).	Durante un pretratamiento oxidativo una gran cantidad de azúcares se pierden, porque no es un proceso selectivo. También se forman los compuestos solubles de lignina, lo que puede dar la inhibición en la conversión posterior de hemicelulosa en etanol (Hendriks y Zeeman, 2009).
PRETRATAMIENTO BIOLÓGICO		
Tratamiento con Hongos	Solubilización de la lignina e hidrólisis de la hemicelulosa casi total.	Para reducir costos y evitar problemas en la posterior etapa de fermentación, se deben reciclar los solventes.
Tratamiento con bio-solventes	Bajo requerimiento energético. Producción del proceso a condiciones ambientales.	La tasa de hidrólisis es demasiado lenta.

Fuente: Sánchez, Gutiérrez, Muñoz & Rivera (2010).

1.15. Hidrólisis

La hidrólisis o sacarificación se refiere a los procesos que convierten los polisacáridos en azúcares monoméricos.

La hidrólisis permite obtener un medio rico en azúcares fermentables, ya que al romper la celulosa y la hemicelulosa se obtienen hexosas y pentosas (Rodríguez, 2016).

1.15.1. Tipos de hidrólisis

1.15.1.1. Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica puede resultar una mejora en la obtención de azúcares fermentables.

Este tipo de hidrólisis utiliza diferentes clases de ácidos: sulfuroso, clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, fosfórico, nítrico y fórmico. Estos ácidos pueden ser concentrados o diluidos. Los ácidos concentrados se llevan a cabo con temperaturas bajas, además solubilizan los polisacáridos dejando como residuo la lignina. Mientras que los ácidos diluidos, requieren de altas temperaturas para un rendimiento aceptable, además solubilizan la hemicelulosa y deja como residuo la lignina y la celulosa (Galbe y Zacchi, 2002).

1.15.1.2. Hidrólisis alcalina

El tratamiento alcalino es capaz de separar tanto la hemicelulosa como la lignina, sin tener grandes efectos sobre los demás componentes.

Con este tipo de hidrólisis la biomasa lignocelulósica experimenta un aumento de su área superficial interna, además de un descenso del nivel de cristalización, permitiendo la separación de las uniones estructurales que existe entre la lignina y los carbohidratos, y produciendo la rotura de la estructura de la lignina. El tratamiento alcalino causa la solubilización de hemicelulosa y lignina. Se puede presentar la pérdida de productos o la formación de inhibidores (Sánchez, Gutierrez, Muñoz & Rivera, 2010).

1.15.1.3. Hidrólisis enzimática

La sacarificación o hidrólisis enzimática permite la producción de azúcares fermentables a partir de materiales lignocelulósicos, pero la estructura limita este proceso, por lo que se hace necesario un pretratamiento para así poder incrementar el rendimiento de la hidrólisis (Piñeros, Ampar, Proaños, Cortes y Ballesteros, 2011).

La hidrólisis enzimática consiste en la degradación microbiana de los residuos lignocelulósicos mediante enzimas, donde la más empleada es la celulasa; su ventaja es el ahorro de energía y la desventaja es que puede requerir de una detoxificación por la formación de inhibidores (Abascal, 2017).

En la hidrólisis enzimática, la sacarificación de la celulosa se lleva a cabo enzimáticamente mediante celulasas, las cuales producen la ruptura de las cadenas poliméricas de la celulosa y la hemicelulosa, que previamente han sido modificadas estructuralmente en el pretratamiento. A partir de la celulosa se obtiene glucosa, mientras que a partir de la hemicelulosa se obtienen diferentes monosacáridos, tales como xilosa, glucosa, arabinosa, galactosa y manosa, entre otros.

La principal ventaja de la hidrólisis enzimática sobre la química, es que la enzimática no presenta problemas de corrosión.

La hidrólisis enzimática es un método específico, realizado en condiciones relativamente suaves (50°C), que permite rendimientos de hidrólisis superiores a los obtenidos por vía química.

El procedimiento más común consiste en poner en contacto la disolución de enzima con la muestra del sustrato lignocelulósico previamente pretratado, manteniendo el pH, la temperatura y la homogeneidad de la mezcla durante todo el proceso. Una vez determinadas las condiciones óptimas de pH y temperatura, las posibilidades de optimización son bastante limitadas.

Los factores que afectan la hidrólisis enzimática de la celulosa incluyen: el tipo de sustrato, la actividad celulasa y las condiciones de reacción: temperatura y pH. (Pandey, Larroche, Ricke, Dussap y Gnansounou).

1.15.2. Ventajas y desventajas de los tipos de Hidrólisis

Método	Ventajas	Desventajas
Hidrólisis Ácida	Disuelve la celulosa junto con la hemicelulosa en forma de sacáridos simples.	Las disoluciones son muy corrosivas y por ello el material a utilizar, de acero inoxidable con alta capacidad anticorrosiva, tiene un costo elevado. Se produce pérdida de producto y formación de inhibidores.
Hidrólisis Alcalina	Solubiliza la hemicelulosa y lignina.	Se puede presentar pérdida de productos o la formación de inhibidores.
Hidrólisis Enzimática	Se lleva a cabo mediante celulasas, las cuales producen la ruptura de las cadenas poliméricas de la celulosa. En este proceso no se forman productos de degradación. No causa corrosión.	Inactivación de enzimas por procesos térmicos o control de pH, encarece productos.

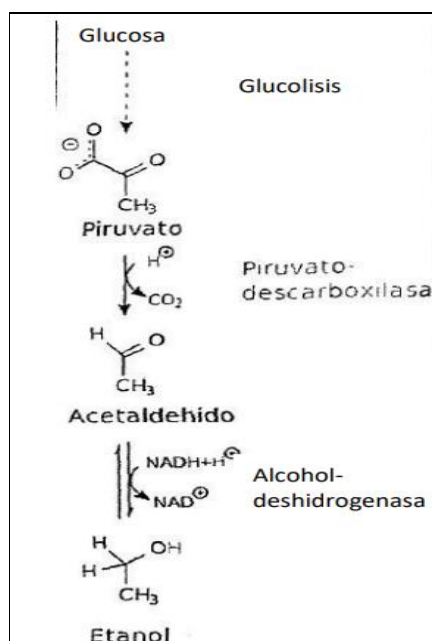
Fuente: Sánchez, Gutiérrez, Muñoz & Rivera (2010).

1.16. Fermentación

La fermentación alcohólica es un proceso biológico que ocurre en ausencia de aire, se da mediante la acción de microorganismos que procesan los hidratos de carbono (glucosa) para obtener alcohol (etanol) como principal producto (Sánchez & Fajardo, 2018).

Una fermentación se define como un proceso mediante el cual materia orgánica (sustrato) sufren un conjunto de cambios químicos (reducciones y oxidaciones) que producen energía. Al finalizar la fermentación, se presenta una acumulación de varios productos, unos más oxidados y otros más reducidos que el sustrato, con un balance de energía positivo. Esta energía es empleada en el metabolismo de los microorganismos (Espinoza, 2013).

Figura 1-5: Ruta Metabólica de la Fermentación Alcohólica



Fuente: Arellano, 2015.

El rendimiento de etanol producido dependerá del rendimiento en los azúcares y de la fermentabilidad de la solución (Galbe y Zacchi, 2002).

1.16.1. Parámetros a controlar en el proceso de fermentación

1.16.1.1. Temperatura

Los microorganismos tienen un intervalo de temperaturas donde pueden desarrollarse de manera pésima, intermedia u óptima. A temperaturas bajas, el metabolismo celular es lento y las células paran de crecer; algunas veces suelen morir. Sin embargo, cuando

la temperatura es superior a la óptima, se produce la muerte celular rápidamente; si posteriormente se baja la temperatura, los microorganismos no logran recuperar su capacidad de reproducirse.

Las levaduras pertenecen a la familia de los microorganismos mesófilos, el rango de temperatura en el cual pueden llevar a cabo el proceso de fermentación alcohólica está entre 15-35 °C aproximadamente. A mayor temperatura, mayor será la velocidad del proceso; pero se corre el riesgo de que las levaduras se agoten antes; pero, a menores temperaturas el rendimiento suele ser mayor. Arriba de 33-35°C se corre el riesgo de una contaminación bacteriana. (Romero, 2006).

1.16.1.2. Aireación

El oxígeno es importante, es necesario para poder sintetizar esteroides y ácidos grasos insaturados que son componentes principales de la membrana celular; sin estos componentes la levadura no puede salir de su estado de inactividad, ni multiplicarse.

Saccharomyces cerevisiae es una levadura que posee alta actividad metabólica, por lo que en un proceso fermentativo en fase aerobia produce biomasa; mientras que en un proceso anaerobio produce etanol.

La absorción de oxígeno disuelto por parte de la levadura es un proceso rápido, la absorción de azúcares es un proceso mucho más lento.

Cuando el oxígeno ya no está disponible, las levaduras se ven forzadas a hacer uso del metabolismo anaerobio, con el cual es inherente a la producción de alcohol (Fajardo y Sarmiento, 2007).

1.16.1.3. pH

La concentración de iones hidrógeno es un factor importante que afecta en velocidad de crecimiento de células. En un intervalo de pH entre 4.0 a 6.0 las levaduras, tanto la velocidad de crecimiento, como también el rendimiento, se ven óptimamente

favorecidas. Un cambio el pH del medio puede afectar la composición y la naturaleza de la superficie microbiana al disociarse ácidos y bases (Fajardo y Sarmiento, 2007).

1.16.1.4. Nutrientes

El medio de cultivo tiene que tener todos los nutrientes necesarios. Las levaduras necesitan los azúcares para su catabolismo (obtener energía); a la vez, también requieren otros sustratos para su anabolismo (nitrógeno, fósforo, carbono, azufre, potasio, magnesio, calcio y vitaminas (Romero, 2006).

1.17. Levaduras

Las levaduras son los microorganismos de mayor uso en la producción de etanol, debido a su productividad, baja producción de inhibidores y facilidad de separación después de la fermentación.

Las levaduras por definición son hongos unicelulares, usualmente de forma ovalada, con estados vegetativos que se reproducen predominantemente por gemación o fisión, dando como resultado un crecimiento unicelular; aunque algunas pueden ser dimorfas o bifásicas y crecer como micelio bajo condiciones ambientales apropiadas (Ochoa y Vázquez-Juares, 2004).

1.17.1. *Saccharomyces cerevisiae*

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo convencional para la fermentación de azúcares derivados de celulosa. Las cepas silvestres de *S. cerevisiae* pueden fermentar glucosa, manosa y fructosa, así como los disacáridos sacarosa y maltosa a través de la glucólisis.

Saccharomyces cerevisiae es la especie de levadura más estudiada y químicamente mejor comprendida. Es bien conocido por el papel que desempeña en la producción de etanol a nivel industrial. Esta levadura convierte los azúcares fermentables en etanol, dióxido de carbono, y una variedad de compuestos incluyendo alcoholes, ésteres, aldehídos y ácidos (Yalcin & Ozbas, 2008).

Son organismos que no representan grandes riesgos a la hora de ser manipulados; no es exigente en cuanto a su cultivo, no representa alto costo, tolera altas concentraciones de etanol. En la fermentación produce bajos niveles de subproductos, es osmotolerante, capaz de utilizar altas concentraciones de azúcares. Presenta alta viabilidad celular para el reciclado y características de floculación y sedimentación para el proceso posterior (Fajardo y Sarmiento, 2007).

Presenta como ventajas su fácil manejo y alta velocidad de crecimiento en comparación con las bacterias en condiciones anaerobias.

Tabla I-8: Clasificación Taxonómica de *Saccharomyces cerevisiae*.

Categoría	Taxón
Reino	Hongo
División	<i>Amastogomycota</i>
Clase	<i>Ascomycetes</i>
Subclase	<i>Hemiascomycetidae</i>
Orden	<i>Endomycetales</i>
Familia	<i>Saccharomycetaceae</i>
Subfamilia	<i>Saccharomycetidae</i>
Género	<i>Saccharomyces</i>
Especie	<i>Cerevisiae</i>

Fuente: Gutiérrez, 2017.

1.17.1.1. Morfología de la levadura

1.17.1.1.1. Forma y tamaño

Son esféricas, elípticas y cilíndricas su tamaño varía notablemente; en cuanto a la *Saccharomyces cerevisiae*, su diámetro oscila entre 2 a 8 micras (Nieto, 2009).

1.17.1.1.2. Estructura celular

Una célula de levadura está incluida en una pared celular y por una membrana citoplasmática en la que contienen un núcleo, una vacuola y numerosos gránulos y glóbulos de grasa. No contiene flagelos u otros órganos de locomoción. La pared

celular está integrada por polímeros de glucosa y manosa, con cantidades pequeñas de proteínas, lípidos y quitina (Nieto, 2009).

1.17.1.2. Fisiología de las levaduras

1.17.1.2.1. Requerimientos nutricionales

Saccharomyces cerevisiae requiere ciertos nutrientes y algunas condiciones ambientales para un adecuado crecimiento y reproducción. Algunos nutrientes son básicamente necesarios como el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo (Fajardo y Sarmiento, 2007).

La concentración de nutrientes puede afectar tanto a la velocidad de crecimiento, como también al rendimiento del crecimiento del organismo. El efecto que tienen la concentración de los nutrientes sobre la producción de las células se puede comprender de la siguiente manera: el nutriente se convierte en material celular, cuanto más nutrientes haya, mayor será la producción de células. La razón para reducir la velocidad de crecimiento a concentraciones muy bajas de nutriente, es porque no se puede transportar ese nutriente al interior de la célula con suficiente rapidez para satisfacer las demandas metabólicas del nutriente y la velocidad de crecimiento es proporcional a la concentración de dichos nutrientes: sin embargo, a estas concentraciones bajas, el nutriente es utilizado para la proliferación (Nieto, 2009).

1.18. Enzimas

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sean termodinámicamente posibles. Un catalizador es una sustancia que disminuye la energía de activación de una reacción química. Al disminuir la energía de activación, se incrementa la velocidad de la reacción. Una enzima hace que una reacción química que es energéticamente posible pero que transcurre a una velocidad muy baja transcurra a mayor velocidad que sin la presencia de la enzima. Las enzimas reaccionan sobre sustratos para agilizar la producción de productos (Cruz, 2013).

1.19. Destilación

Las tecnologías para la conversión de lignocelulosa en etanol generalmente dan como resultado la producción de caldos de fermentación que contienen concentraciones moderadas a bajas de etanol, que se recupera tradicionalmente por destilación. Existen otras tecnologías como la fermentación al vacío, uso de membranas, extracción con disolventes orgánicos, etc. (Duff y Murray, 1996).

La destilación tiene como objetivo de rectificar y purificar el etanol. “Este proceso se realiza de forma convencional con el objeto de eliminar el agua presente en el combustible. Teniendo en cuenta que el punto de ebullición del etanol es de 78.3°C y el del agua es 100°C” (Abascal, 2017).

1.19.1. Destilación Simple

En este tipo de destilación se produce la vaporización de un material por la aplicación de calor; el método es empleado en la industria de capacidad moderada y pequeña, para llevar a cabo separaciones parciales de los componentes más volátiles de mezclas de líquidos miscibles.

La primera porción del destilado será la más rica en el componente más volátil y conforme continúa la destilación, el producto evaporado se va empobreciendo. Por lo tanto, el destilado puede recolectarse en varios lotes separados llamados fracciones, obteniéndose así una serie de productos destilados de diferente grado de pureza.

1.19.2. Destilación Fraccionada

Una columna de fraccionamiento consta de un tubo de vidrio de gran superficie interna que facilita el intercambio de calor entre el vapor ascendente (más caliente) y el condensado descendente (más frío). Con ello, aparecen a lo largo de la columna multitud de vaporizaciones y condensaciones (equilibrios líquido – vapor), resultando que a medida que se asciende en la columna, el vapor es cada vez más rico en uno de los componentes, mientras que el residuo se enriquece en el otro.

1.20. Normativa para el Bioetanol en Bolivia

1.20.1. Bioetanol como Aditivo de Origen Vegetal

La Resolución Ministerial N° 120 – 18 del 3 de octubre de 2018, reglamenta las características técnicas de calidad del Etanol Anhidro para su utilización como Aditivo de Origen Vegetal.

Tabla I-9: Características Técnicas de calidad del Etanol Anhidro

Características	Unidad	Límite
Aspecto	-	Claro y libre de impurezas
Acidez total, máx.	mg/L	30
Densidad a 60 °F	g/cm ³	0,7968 máx.
Graduación Alcohólica	% vol	99,5 mín.
Contenido de Etanol, mín.	% vol	98
Contenido de agua, máx.	% vol	0,5
Contenido de Metanol, máx.	% vol	0,5
Sulfato, máx.	mg/kg	4

Fuente: Resolución Ministerial N° 120 – 18, 2018.

1.20.2. Bioetanol como desinfectante

La adecuada antisepsia y desinfección de manos, ropa y objetos es fundamental para prevenir la propagación de las enfermedades infectocontagiosas y tiene como objetivo principal la inactivación de los microorganismos presentes en el área de contacto (Olivera, García, Manzo, 2015).

En nuestro país es ampliamente utilizado con estos propósitos el etanol al 70% v/v (equivalente a 70°).

Tabla I-10: Características de bioetanol como desinfectante

Características	Unidad	Límite
Estado Físico	-	Líquido
Apariencia	-	Transparente
Olor	-	Característico al Etanol
Concentración	% v/v	70
Densidad (20°C)	g/ml	0,83 - 0,89

Fuente: Difem, 2017.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1.Descripción de la materia prima

La cascarilla de arroz es un desecho o residuo agroindustrial, se produce en altos volúmenes en zonas donde se siembra y se procesa la planta de arroz.

Bolivia es un país productor de grano de arroz, se cultiva esta planta en siete departamentos (excepto Oruro y Potosí), el departamento con mayor producción es Santa Cruz con un 70%, el segundo es el Beni con un 11% y en tercer lugar está La Paz con un 8,5%. (Revista Industrial 4.0, 2022)

En el presente trabajo se utilizó cascarilla de arroz, obtenida de productores de arroz del departamento de Santa Cruz.

Figura 2-1: Recolección de la Cascarilla de Arroz.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.1.1. Análisis Físico-químico de la materia prima

Para la caracterización físico-química de la materia prima se llevaron muestras de cascarilla de arroz al Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), esto a fin de que sean analizados, para lo cual se pesaron 300 gr. de cascarilla de arroz en un recipiente plástico y se envió a dicho establecimiento para su análisis, en el cuál se determinaron parámetros básicos de la materia prima, tales como contenido de

humedad, cenizas, materia grasa, proteínas, fibras e hidratos de carbono (Ver ANEXO A).

Figura 2-2: Muestra de cascarilla de arroz

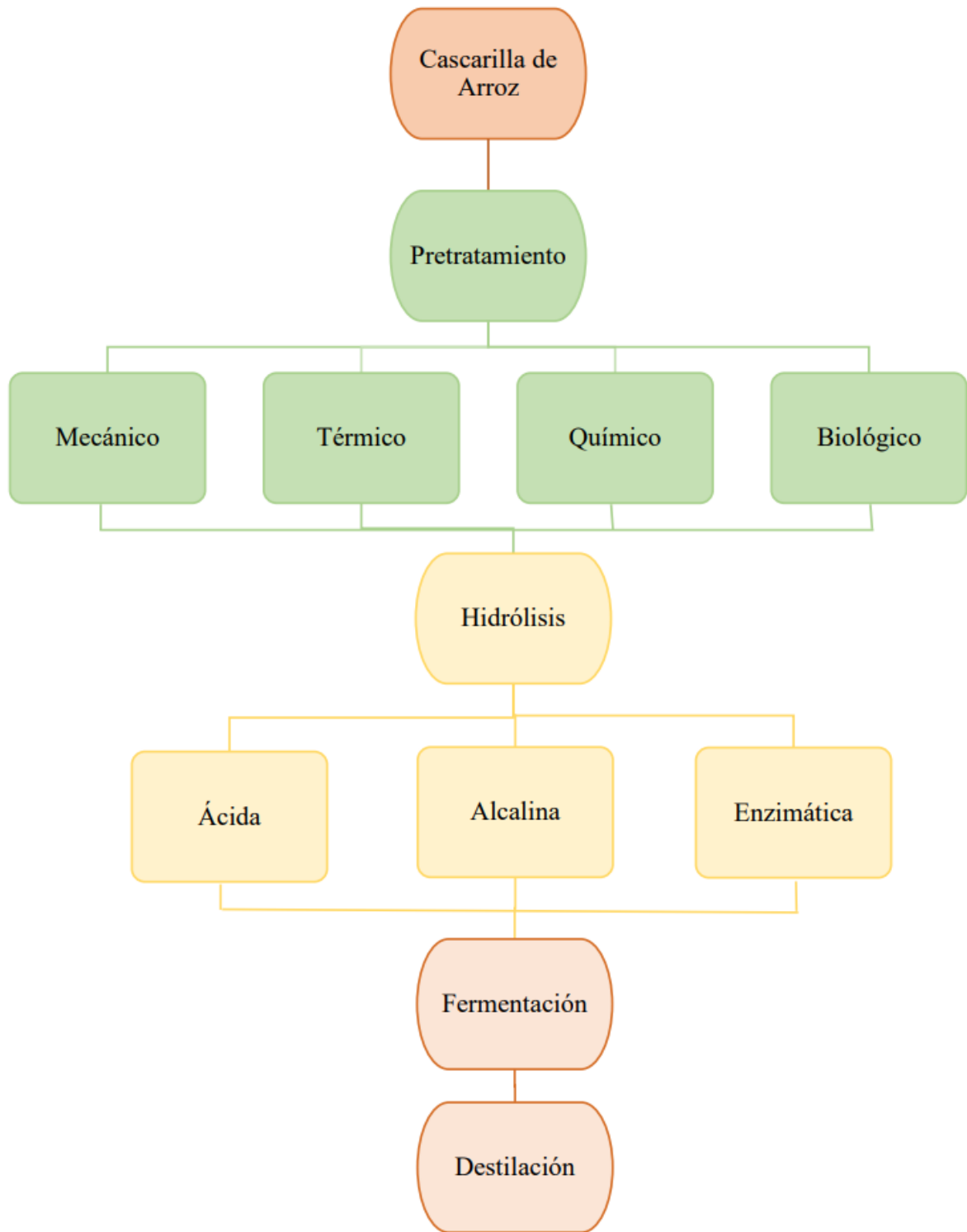


Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.2. Selección del proceso a emplear para el proceso de Producción de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz

Tal como se expuso en apartados anteriores, existen varias alternativas para cada etapa que forma el proceso de obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, por esta razón es necesario analizar las ventajas, desventajas, las características de estas alternativas y realizar la selección correspondiente para conformar el proceso más adecuado a emplear.

Figura 2-3: Alternativas a seleccionar en el Proceso de Obtención de Bioetanol



Fuente: Elaboración Propia.

2.2.1. Selección de la etapa de pretratamiento

A continuación, se identifican los factores a considerar al momento de seleccionar el proceso de pretratamiento en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz.

Tabla II-1: Factores a evaluar en la selección del pretratamiento a utilizar

Factor evaluado	Descripción	Ponderación (%)
Eficiencia	Eficiencia aceptable en la remoción de la lignina.	40
Disponibilidad de materiales y tecnología	Existencia de equipos y materiales involucrados en el proceso.	25
Costo	Los costos deben ser bajos.	20
Formación de compuestos inhibitorios	Baja formación de inhibidores.	15

Fuente: Elaboración Propia, 2023.

Tabla II-2: Escala de puntaje a emplear

Puntaje Asignado (PA) 1-5				
1	2	3	4	5
No aplicable	Muy poco aplicable	Poco aplicable	Moderadamente Aplicable	Aplicable

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla II-3: Cuadro de selección del pretratamiento a utilizar

Factor evaluado		Pretratamiento Mecánico			Explosión con Vapor			Agua Caliente Líquida Presurizada			Pretratamiento Químico (Medio)		
		Descrip.	PA	Pond.	Descrip.	PA	Pond.	Descrip.	PA	Pond.	Descrip.	PA	Pond.
Eficiencia	4	Baja	2	8	Alta	4	16	Alta	4	16	Alta	4	16
Disponibilidad de materiales y tecnología	2,5	Nivel Moderado	3	7,5	Nivel Bajo	2	5	Nivel Bajo	2	5	Nivel Moderado	4	10
Costo	2	Elevado costo energético	2	4	Bajo	5	10	Moderado	3	6	Alto	4	8
Formación de compuestos inhibitorios	1,5	Nula formación de Inhibidores	5	7,5	Generación de inhibidores	2	3	Baja formación de inhibidores	4	6	Posible formación de inhibidores	4	6
Total				27			34			33			40

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Considerando cada factor tomado en cuenta para la evaluación en la selección del proceso de pretratamiento en la obtención de bioetanol a partir de la cascarilla de arroz, la opción más conveniente a utilizar es un pretratamiento químico en medio alcalino, el que obtuvo un puntaje igual a 40.

2.2.2. Selección de la Hidrólisis a utilizar en la obtención de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz

A continuación, se identifican los factores a considerar al momento de seleccionar el proceso de hidrólisis:

Tabla II-4: Factores a evaluar en la selección de la hidrólisis a utilizar

Factor Evaluado	Descripción	Ponderación (%)
Eficiencia	Alta eficacia en la conversión de celulosa	40
Disponibilidad de materiales y tecnología	Existencia de equipos y materiales involucrados en el proceso.	25
Costo	Los costos deben ser bajos.	20
Formación de compuestos Inhibidores	Baja formación de compuestos inhibidores que afecten el proceso.	15

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla II-5: Escala de puntaje a emplear

Puntaje Aplicado (PA) 1-5				
1	2	3	4	5
No aplicable	Muy poco aplicable	Poco aplicable	Moderadamente Aplicable	Aplicable

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla II-6: Selección de Hidrólisis a emplear en el proceso de obtención de Bioetanol

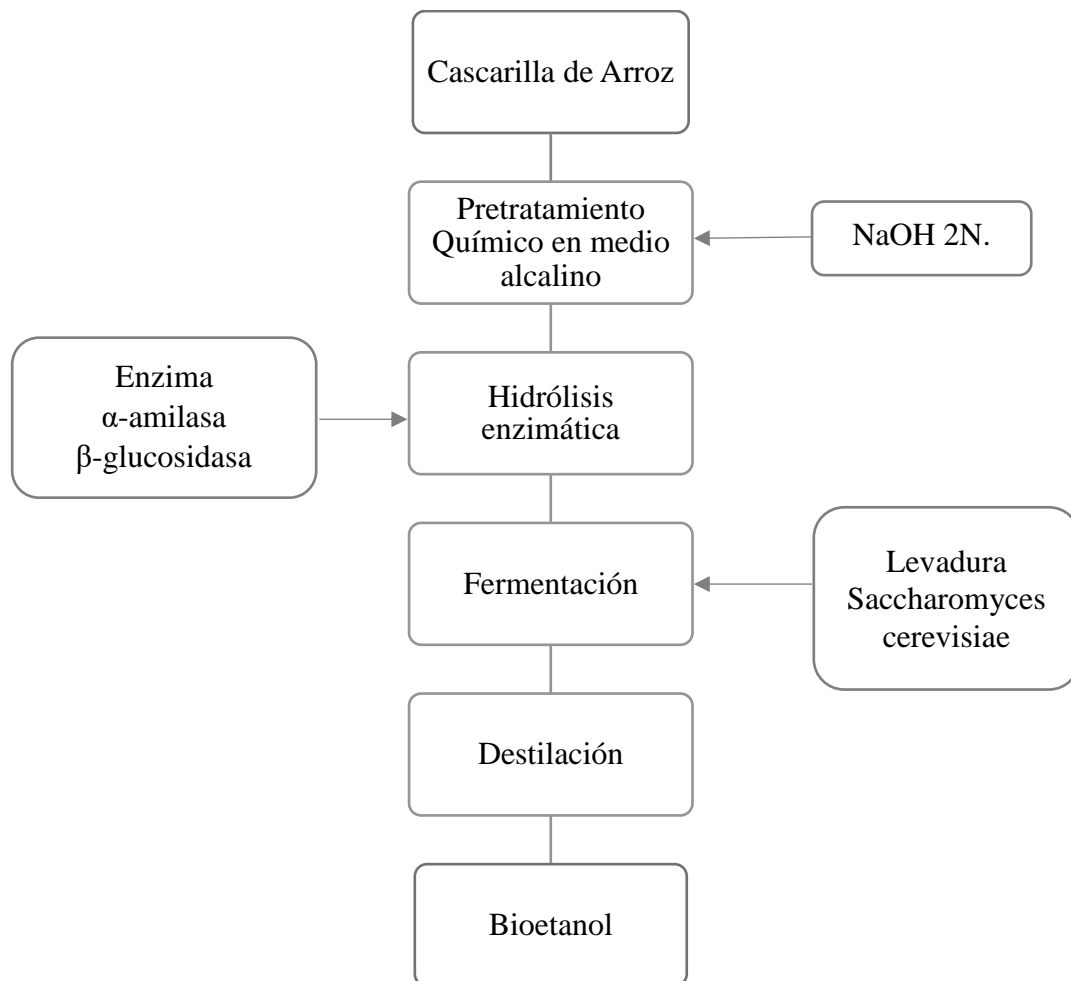
Factor Evaluado		Hidrólisis Ácida			Hidrólisis Enzimática		
		Descripción	PA	Ponderación	Descripción	PA	Ponderación
Eficiencia	4	Moderada	4	16	Moderada	4	16
Disponibilidad de materiales y tecnología	2,5	Baja	2	5	Moderada	3	7,5
Costo	2	Altos	2	4	Altos	2	4
Formación de compuestos Inhibidores	1,5	Formación de inhibidores	2	3	Baja o nula formación de inhibidores	4	6
Total				28			33,5

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Considerando cada factor tomado en cuenta para la evaluación en la selección del proceso de hidrólisis en la obtención de bioetanol a partir de la cascarilla de arroz, la opción más conveniente a utilizar es la hidrólisis enzimática, la que obtuvo un puntaje igual a 33,5.

2.3. Proceso seleccionado a emplear en la Producción de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz

Una vez analizadas las alternativas en las etapas que se mostraron anteriormente, se puede establecer el proceso para la obtención de bioetanol a partir de la cascarilla de arroz, el cual se realizará de la siguiente manera:



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.4. Diseño Experimental para el proceso de obtención de bioetanol

En la presente investigación se presenta un diseño factorial, el cual se aplicó en la etapa de hidrólisis enzimática, el cual se presenta a continuación.

2.4.1. Diseño factorial para la etapa de Hidrólisis Enzimática

Para determinar las variables significativas en el presente trabajo experimental se plantea el diseño factorial de dos niveles y tres variables o parámetros con dos repeticiones, por tanto, el número de experimentos que se realizaron son 16.

La hidrólisis enzimática es un proceso controlado, bajo factores de pH, temperatura y tiempo de desarrollo (Gaviria, Benitez, Lenis y Hoyos, 2015).

Según varios autores, mencionan que la hidrólisis enzimática para el material lignocelulósico se realiza en condiciones leves.

Zumárraga (2012), en su investigación, realizó la hidrólisis enzimática con un rango de temperaturas entre 40 – 50°C y con un pH de 4,5 a 5,5.

Torres y Molina (2012), realizan la hidrólisis del material lignocelulósico a un pH de 4,8 a una temperatura de 50°C por un tiempo de 12 a 48 horas.

En base a la información recabada para el presente trabajo, se fijó dos intervalos de temperaturas 40 y 50°C, con un pH de 4.0 y 5.0 y con un tiempo de desarrollo de 24 y 48 horas.

Tabla II-7: Niveles de variación de los factores en la hidrólisis enzimática

Nivel	pH	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
Inferior	4	40	24
Superior	5	50	48

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial 2^3 .

$$\text{N}^\circ \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$\text{N}^\circ \text{ experimentos} = 2^3 = 8$$

Se realizará dos repeticiones.

$$\text{N}^\circ \text{ experimentos} = 8 * 2 = 16 \text{ experimentos.}$$

La variable respuesta será la concentración de sólidos solubles ($^\circ$ Brix) alcanzados en la hidrólisis.

En la tabla II-8, se muestra el orden de los factores en el diseño experimental para realizar el proceso de hidrólisis enzimática.

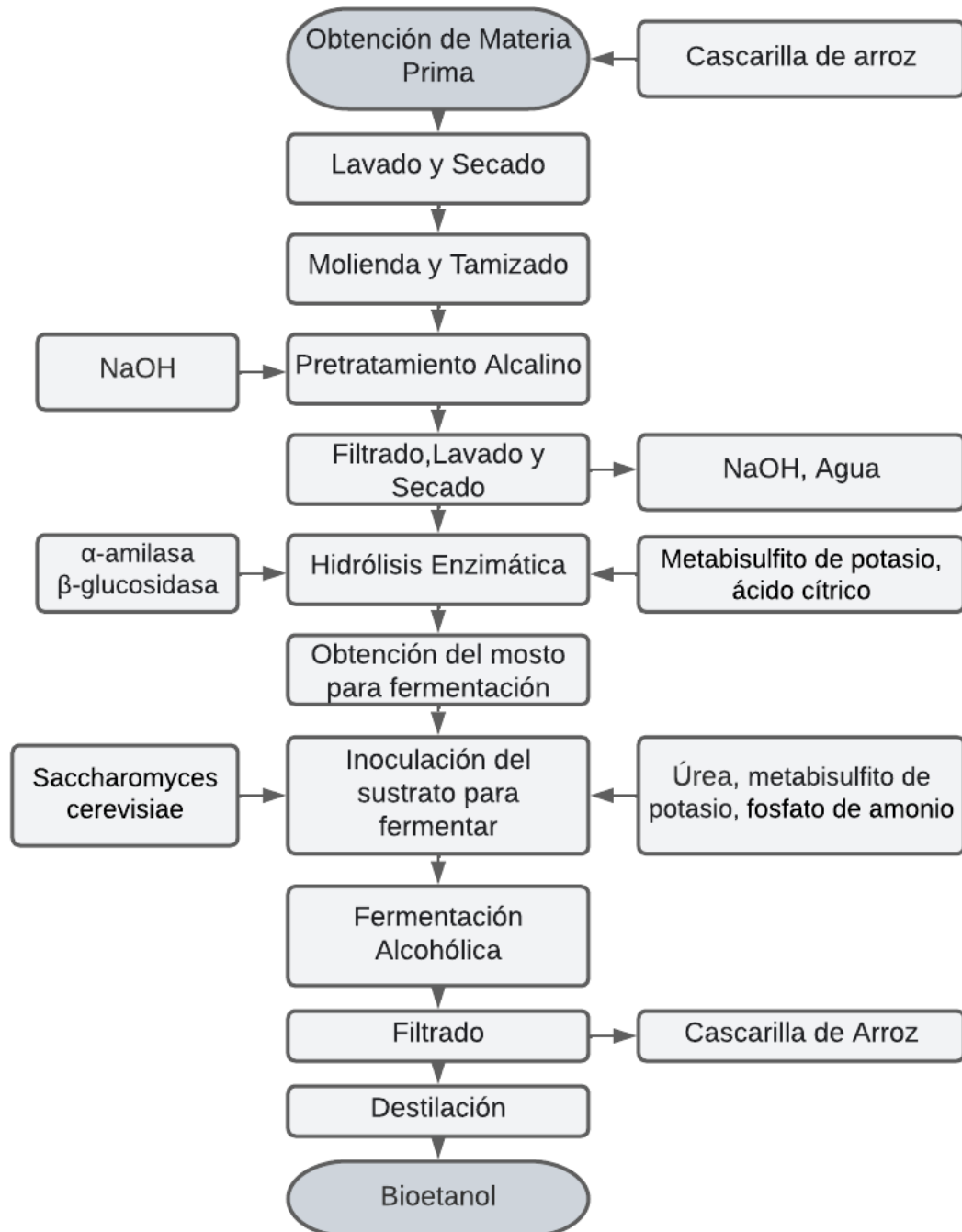
Tabla II-8: Matriz de diseño experimental para el proceso de Hidrólisis Enzimática

Muestra	pH	Temperatura ($^\circ$ C)	Tiempo de Hidrólisis (h)	Concentración de sólidos solubles ($^\circ$ Brix)
1	4	40	24	A ₁
2	5	40	24	A ₂
3	4	50	24	A ₃
4	5	50	24	A ₄
5	4	40	48	A ₅
6	5	40	48	A ₆
7	4	50	48	A ₇
8	5	50	48	A ₈

Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5. Obtención de Bioetanol a escala laboratorio

En la siguiente figura se muestra cada una de las etapas realizadas en el proceso de obtención de bioetanol a escala laboratorio, utilizando cascarilla de arroz:



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.1. Acondicionamiento de la materia prima

La materia prima recolectada se sometió a un acondicionamiento previo a su utilización, el cual consistió de las siguientes etapas:

2.5.1.1. Lavado

Una vez obtenida la materia prima, se procedió al lavado de las muestras de cascarilla de arroz para quitarle todas las impurezas, como ser tierra, arena y otros materiales extraños que podrían afectar posteriormente la etapa de pretratamiento del material.

2.5.1.2. Secado

Luego de realizar el lavado de la cascarilla de arroz, se procedió a eliminar el exceso de humedad presente en la misma, para ello se utilizó un secador a 70°C por un lapso de 3 horas aproximadamente.

Figura 2-4: Cascarilla de arroz en etapa de secado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.1.3. Molienda

La cascarilla de arroz ya lavada y secada se trituroó en un molino de discos manual, hasta obtener un tamaño de muestra representativa, con el objetivo de aumentar el área de contacto en las posteriores etapas para la obtención del bioetanol.

Figura 2-5: Molido de cascarilla de arroz



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.1.4. Tamizado

Concluida la etapa de molienda se realiza una etapa de tamizado, con la finalidad de obtener un solo tamaño de partícula, para que el material tenga una mayor superficie de contacto y se mejore el rendimiento en las siguientes etapas.

La muestra se tamizó en un rotap vibratorio eléctrico (figura 2-5), el cual contiene mallas de acero inoxidable de 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.063 mm de diámetro y un plato receptor de muestra, se tamizó por un lapso de 15 minutos, posteriormente se eligieron las muestras con un tamaño de partícula de 0.5 y 0.25 mm (figura 2-6), una vez ya concluida esta etapa, se recogieron y almacenaron las muestras en recipientes plásticos hasta su uso.

Figura 2-6: Rotap vibratorio eléctrico



Figura 2-7: Muestra seleccionada



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.2. Pretratamiento Alcalino

La cascarilla de arroz ya tamizada, se llevó a un proceso de pretratamiento tipo alcalino, esto con la finalidad de disociar la lignina que se encuentra recubriendo a la celulosa dentro de la biomasa y de esta manera facilitar las etapas posteriores; el pretratamiento se da a 121 °C por 90 minutos con una solución de hidróxido de sodio a una concentración de 2 N, el hidróxido de sodio solubiliza parcialmente la lignina, dejando más accesible la celulosa a la acción enzimática (Lázaro y Arauzo, 1994).

Estas condiciones fueron reportadas por Torres y Molina (2012), Fajardo (2018) y Arismendy, Villa, Alcázar, Chamorro y Área (2021), en sus trabajos de investigación, mismos donde comprueban la eficiencia del pretratamiento alcalino en estas condiciones y su efectividad para la posterior hidrólisis enzimática.

En el presente trabajo se utilizó una relación 1:10 (p/v) entre la cascarilla de arroz y la solución alcalina.

Se pesaron muestras de 100 gr de cascarilla de arroz en una balanza analítica, posteriormente se las pusieron al interior de frascos de vidrio y se añadieron 1000 ml de solución de NaOH 2 N a cada frasco (figura 2-7).

Las muestras se llevaron a un autoclave, donde se realizó el pretratamiento.

El autoclave en su interior contiene agua destilada a temperatura ambiente, cubriendo la resistencia del equipo y asegurando su buen funcionamiento.

Una vez colocadas las muestras dentro del autoclave (figura 2-8), se procedió a cerrar la tapa y se programó el equipo a la temperatura y tiempo anteriormente mencionados (121 °C y 90 min.). Terminado el proceso se sacaron las muestras del autoclave y se dejaron enfriar.

Figura 2-8: Cascarilla de arroz en hidróxido de sodio



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-9: Muestras dispuestas al interior del Autoclave.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.2.1. Filtrado, lavado y secado

Culminado el pretratamiento alcalino, se procedió a filtrar las muestras, esto se realizó en un filtro al vacío por un tiempo aproximado de 35 minutos (figura 2-9).

Una vez filtrado, el remanente fue lavado con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro.

Se hace secar la cascarilla lavada en un secador por 4 horas a 70 °C (figura 2-10), para eliminar la humedad presente en la misma, después de este tiempo la cascarilla está lista para el subsiguiente proceso, que es la hidrólisis enzimática.

Figura 2-10: Filtrado al vacío después del pretratamiento.



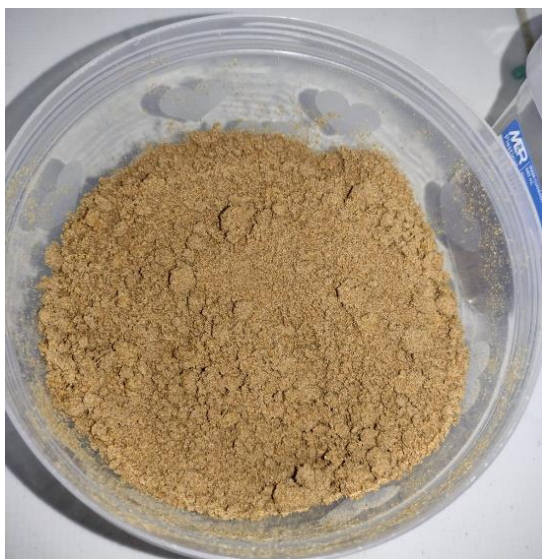
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-11: Secado de la muestra lavada.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-12: Cascarilla de arroz pretrada y seca.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.3. Hidrólisis Enzimática

En este proceso se elabora el diseño factorial, el cual tiene como variables la temperatura, el pH y el tiempo de hidrólisis, y como variable respuesta la concentración de sólidos solubles (°Brix).

La hidrólisis enzimática genera la ruptura de polímeros de celulosa, para obtener monómeros como glucosa y xilosa (Arismendy, Villa, Alcaraz, Chamorro y Area, 2019).

En la etapa de hidrólisis enzimática se emplearon dos tipos de enzimas comerciales, las cuales fueron la α -amilasa y la β -glucosidasa, estas enzimas se usaron de acuerdo a la especificación del fabricante (1 gramo/litro).

El proceso de hidrólisis enzimática se realizó en frascos de 1.5 litros, los cuáles fueron acondicionados con una válvula conectada a una manguera para la salida de gases.

Se pesaron muestras de 50 gr de cascarilla pretratada y se las pusieron con 1000 ml de solución de ácido cítrico ajustando el pH (4.0 y 5.0) siguiendo el diseño factorial (Ver figura 2-12). Posteriormente se agregaron las enzimas, 1 gramo/litro de cada enzima según la especificación del fabricante. Además, se añadió 0.2 gr de metabisulfito de potasio a cada solución para inhibir el crecimiento de organismos como bacterias y hongos durante la hidrólisis.

Una vez preparada la solución se cerró el frasco y se sumergió la manguera de salida de gases en un recipiente con agua, para evitar la entrada de aire.

Los recipientes se introdujeron a un termostato baño maría, a las temperaturas (40 y 50°C) y por el tiempo (24 y 48 horas) siguiendo el diseño factorial (ver figura 2-13).

Una vez culminado el tiempo de hidrólisis, se procedió a realizar la medición de los °Brix con la ayuda de un refractómetro (ver figura 2-14).

Finalizado todo el proceso, se procedió a medir muestras de 300 ml se colocaron en envases plásticos y fueron enviados al Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) para la determinación de azúcares reductores (ver figura 2-15).

Figura 2-13: Ajuste del pH de las soluciones.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-14: Hidrólisis enzimática desarrollándose en un termostato.



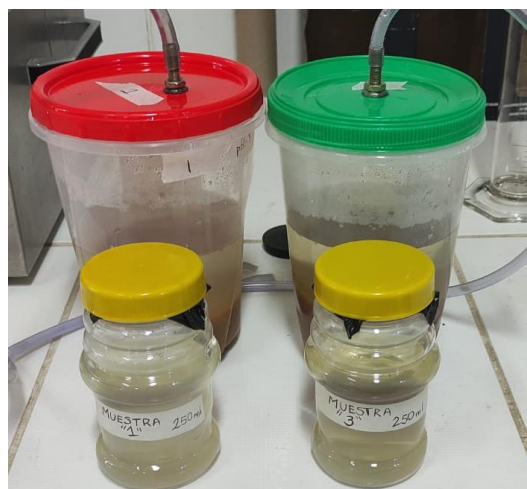
Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-15: Medición de los °Brix obtenidos en la hidrólisis enzimática.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-16: Toma de muestra para posterior análisis.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.4. Obtención del sustrato para Fermentación

Para la etapa de fermentación alcohólica se seleccionó el ensayo con mayor concentración de sólidos solubles (°Brix) obtenido en la hidrólisis enzimática; en esta etapa se realizará un experimento y su respectiva repetición.

Para realizar la etapa de fermentación alcohólica se requieren 10 litros de hidrolizado, razón por la cual es necesario realizar nuevamente todos los pasos anteriormente explicados para la obtención de la cantidad requerida.

Una vez obtenidos los 10 litros de hidrolizado se procede a realizar los pasos previos a la fermentación.

Para dar inicio al proceso, se esterilizaron los materiales que se utilizarán en la fermentación, además, se realizó la esterilización del hidrolizado de cascarilla de arroz, elevando su temperatura a 85 °C por un tiempo de 20 minutos, esto con la finalidad de eliminar microorganismos existentes que obstaculicen el proceso de fermentación; posteriormente se puso el hidrolizado en un recipiente de polipropileno el cuál fue acondicionado con una salida de gases.

Como nutrientes se utilizó fosfato de amonio y úrea, además se reguló el pH a 5.0 haciendo uso de ácido cítrico. Se adicionó igualmente 1 gr de metabisulfito de potasio para evitar que se formen organismos que inhiban el proceso.

Figura 2-17: Sustrato para fermentación.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.5. Fermentación Alcohólica

Para la activación de la levadura *Saccharomyce cerevisiae* se preparó una solución con 200 ml de agua destilada y 10 gramos de sacarosa, esta se calentó hasta una temperatura de 38 °C, posteriormente se pesaron 10 gramos de levadura y se la añadió

a la solución ya preparada, se esperó el tiempo necesario hasta la activación del inóculo, observando un aumento en el volumen y burbujeo. (Ver figura 2-17)

Todo este procedimiento se realizó bajo condiciones de esterilidad para evitar la contaminación de la levadura.

Una vez activada la levadura se la añade al sustrato para fermentación previamente preparado, el cual se encuentra a la misma temperatura que la levadura, se cierra el recipiente y se lo introduce en un termostato baño maría a una temperatura de 30°C, la manguera de salida de gases es introducida a otro recipiente que contiene agua para evitar la entrada de aire (ver figura 2-18).

Puede considerarse que el proceso de fermentación culmina cuando los °Brix marcan cero o permanecen constantes.

Durante el proceso de fermentación, se tomaron muestras cada 24 horas para realizar la medición del consumo del sustrato por parte de la levadura, es decir del consumo de los azúcares, esto a través de la medición de los °Brix en cada muestra, igualmente se midió el pH (ver figura 2-19), esto debido a que a medida que la fermentación avanza el pH se reduce, si hay una reducción considerable se regula el mismo mediante la adición de una base débil.

Figura 2-18: Activación de la levadura *Saccharomyce cerevisiae*



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-19: Fermentación Alcohólica en baño María.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-20: Toma de muestra y medición de pH.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-21: Fermentado obtenido del proceso.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.6. Filtrado

Una vez culminado el proceso de fermentación se procede a filtrar el fermentado, esto se realiza con la ayuda de coladores y gazas para eliminar todos los sólidos (cascarilla de arroz) presentes en el mismo y no afecte a la posterior etapa de destilación.

Figura 2-22: Fermentado ya filtrado.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

2.5.7. Destilación

Una vez filtrado el fermentado, se mide el volumen exacto obtenido y se vierte todo el contenido en el tanque de alimentación de la Columna de Destilación (ver figura 2-22), en la cual se realizará toda esta etapa.

Una vez encendida y programada la columna de destilación se esperó hasta que el fermento alcance su punto de ebullición y caiga la primera gota de destilado.

Se realizó un proceso de separación del destilado en cabeza, corazón y cola, esto de acuerdo a la temperatura de la fase vapor.

La primera fracción recogida de destilado se denomina cabeza, esta fracción es separada debido a su contenido de alcoholes menores y volátiles, además se considera una fracción que posee malos olores y sabores que dañan el producto final. La fracción de la cabeza se recogió en una proporción del 3% de la carga total alimentada, una vez recogida, se vertió la muestra en una probeta de 200 ml y se realizó la lectura del grado alcohólico con ayuda de un alcoholímetro, la muestra del primer experimento tiene un grado alcohólico de 82°GL, la muestra del segundo experimento tiene un grado alcohólico de 79°GL.

Posteriormente se procedió a recoger el corazón, este es la fracción central del proceso de destilación, igualmente se realizó la lectura del grado alcohólico con la ayuda de un alcoholímetro, la muestra del primer experimento tiene un grado alcohólico de 78°GL, la muestra del segundo experimento tiene un grado alcohólico de 76°GL.

Finalmente se recogió la cola, esta es la tercera y última parte del destilado en recolectarse, igualmente se realizó la medición del grado alcohólico el cuál en el primer experimento fue de 63°GL y en el segundo experimento fue de 61°GL.

Una vez terminado el proceso de destilación, se midieron muestras de 750 ml de cada experimento y fueron enviadas al Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), para su respectivo análisis.

Figura 2-23: Columna de destilación.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-24: Medición del grado alcohólico.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Figura 2-25: Bioetanol obtenido de la destilación.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

CAPÍTULO III
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.Resultados obtenidos en la Materia Prima

3.1.1. Análisis proximal de la Cascarilla de Arroz

Los análisis proximales comprenden la determinación del porcentaje de humedad, cenizas, materia grasa, fibra, proteína, carbohidratos; en la tabla III-1 se muestra los resultados del análisis proximal de la materia prima, realizado por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), extraída del informe de los resultados de análisis de dicha muestra (Ver ANEXO A)

Tabla III-1: Análisis Proximal de la Cascarilla de Arroz

Parámetro	Composición %
Ceniza	14.15
Fibra	49.12
Grasa	0.50
Hidratos de Carbono	27.44
Humedad	6.60
Proteína total	2.19
Valor energético	123.02 (Kcal/100 g)

Fuente: CEANID, 2023.

Se puede apreciar que la fibra y los hidratos de carbono son de mayor porcentaje, 49.12% y 27.44% respectivamente, tomando en cuenta que la fibra, está compuesta principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa; y los hidratos de carbono para este tipo de material se presentan principalmente en forma de polímeros de celulosa, estos porcentajes nos muestran el potencial de la cascarilla de arroz para la obtención de azúcares fermentables.

3.1.2. Análisis Granulométrico

En la tabla III-2 se muestra los resultados del análisis granulométrico de la cascarilla de arroz:

Tabla III-2: Análisis Granulométrico

Malla	Masa (g)	Porcentaje (%)
Rechazo 0.063 mm	55,345	7,491
Rechazo 0,25 mm	292,972	39,654
Rechazo 0,5 mm	237,357	32,127
Rechazo 1 mm	101,024	13,674
Rechazo 2 mm	52,121	7,055
Total	738,819	100,000

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El tamaño de muestra para residuos lignocelulósicos a usar en la hidrólisis deber ser menor a 1 mm según bibliografía consultada (Apaza y Ramírez, 2021; Sánchez, 2018); como se puede observar, se tiene 39.654% en la malla de 0.25 mm y 32.127% en la malla de 0.5 mm, por esta razón se optó por utilizar estos tamaños de partícula, los cuales se encuentran dentro del rango de tamaño sugerido.

3.2.Resultados obtenidos en el Pretratamiento Alcalino

En el pretratamiento alcalino se utilizó cascarilla de arroz en base seca con hidróxido de sodio 2 N, en una relación 1:10 (p/v) (Ver Tabla III-3).

Tabla III-3: Relación entre Cascarilla de arroz e Hidróxido de Sodio

Muestra	Cascarilla de Arroz (g)	Hidróxido de Sodio 2 N (ml)
1	100,003	1000
2	100,048	1000
3	100,007	1000
4	100,091	1000
5	100,012	1000
6	100,015	1000
7	100,016	1000
8	100,070	1000
Promedio	100,033	1000

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla III-4: Masa que se retira en el pretratamiento alcalino

Muestra	Cascarilla de Arroz (g)	Cascarilla de Arroz después del Pretratamiento (g)	Masa Retirada en el Pretratamiento (g)
1	100,003	51,548	48,455
2	100,048	52,312	47,736
3	100,007	50,085	49,922
4	100,091	54,845	45,246
5	100,012	53,852	46,160
6	100,015	58,456	41,559
7	100,016	52,982	47,034
8	100,070	56,841	43,229
Promedio	100,033	53,865	46,168

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-4 se puede observar que hay una reducción significativa respecto al material inicial luego de realizado el pretratamiento, esto se debe a los componentes eliminados en el mismo, además que una vez finalizado el pretratamiento se le realizan múltiples lavados con agua destilada con el propósito de neutralizarlo, en los cuales se generan pérdidas considerables de material.

3.2.1. Resultados del Secado posterior al Pretratamiento

Para llevar a cabo el proceso de hidrólisis, se necesita la materia prima deshidratada. Se procedió a secar la cascarilla de arroz proveniente del pretratamiento, esto se realizó en un secador a 70°C por un tiempo determinado, hasta que el peso de la muestra se mantenga constante.

En la tabla III-5 se muestran los datos del peso de la cascarilla de arroz respecto al tiempo, asimismo, en la tabla III-6 se muestran los datos de la humedad de la cascarilla de arroz pretratada respecto al tiempo.

Tabla III-5: Datos de la curva de secado

Tiempo (min)	Peso cascarilla de arroz (g)
0	191,953
30	185,315
60	172,404
90	105,456
120	64,959
150	61,147
180	58,985
210	58,841
240	58,841

Fuente: Elaboración propia, 2023.

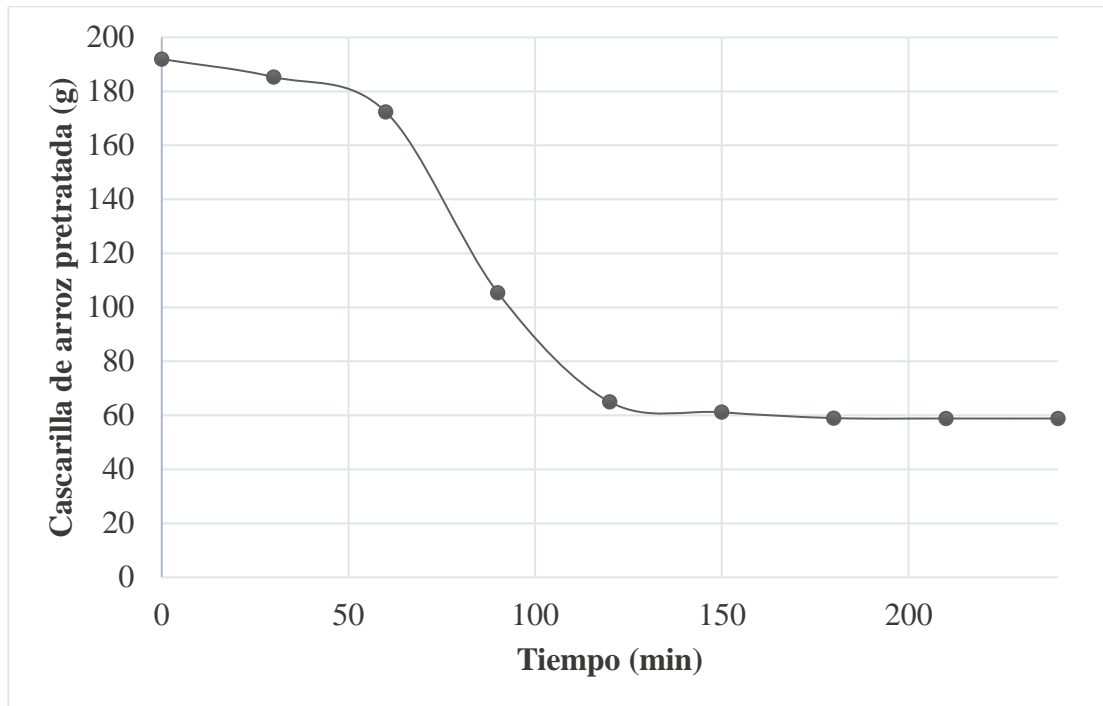
A partir de los datos de secado, se puede determinar la humedad de la muestra mediante la ecuación (3-1):

$$\text{Humedad Relativa (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3-1})$$

$$\text{Humedad Relativa (\%)} = \frac{191.953 - 58.841}{191.953} * 100$$

$$\text{Humedad Relativa (\%)} = \mathbf{69.346}$$

En la figura 3-1, se puede visualizar la curva de la variación del peso de la cascarilla de arroz debido a la pérdida de agua en el proceso de secado.

Figura 3-1: Curva de Secado

Fuente: Elaboración propia, 2023.

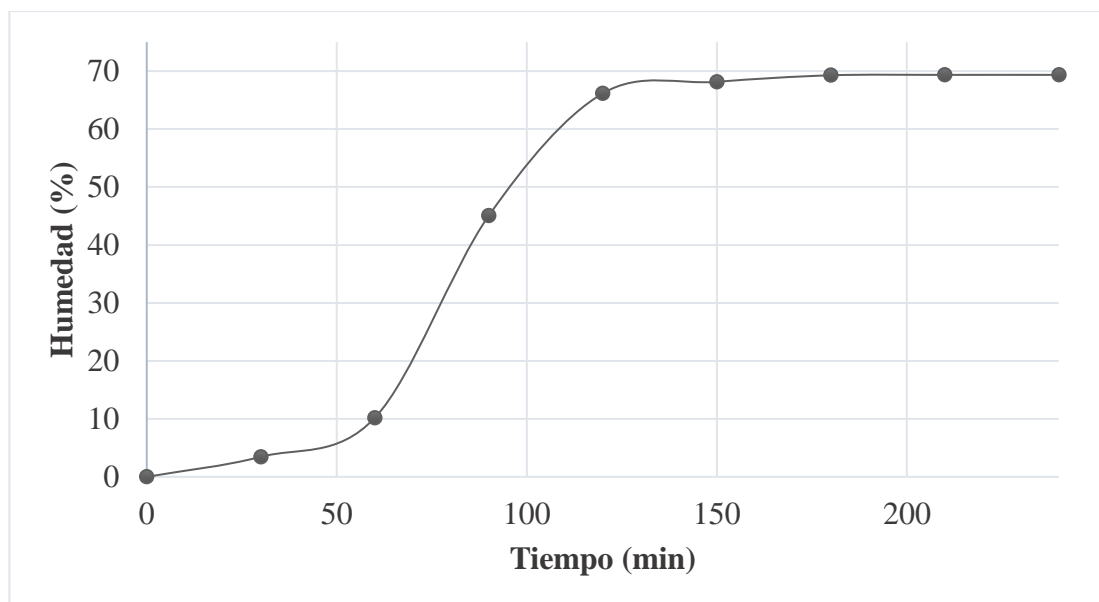
Tabla III-6: Datos de la Humedad de la cascarilla de arroz pretratada

Tiempo	Humedad %
0	0,000
30	3,458
60	10,184
90	45,062
120	66,159
150	68,145
180	69,271
210	69,346
240	69,346

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 3-2, se puede apreciar la variación de la humedad de la cascarilla de arroz proveniente del pretratamiento respecto al tiempo.

Figura 3-2: Porcentaje de Humedad cascarilla de arroz pretratada



Fuente: Elaboración propia, 2023.

En las tablas y figuras anteriores, se detallan los datos de interés en la determinación de la humedad de la cascarilla de arroz proveniente del pretratamiento alcalino, las cuales indican los tiempos de secado, la variación del peso de muestra y la humedad de la misma.

Se puede apreciar que durante los primeros 30 minutos de secado no existe una pérdida de humedad considerable, asimismo, se observa que se llega a un descenso crítico de la humedad en el intervalo de 60 a 120 min, posteriormente se ingresa en una etapa donde la pérdida de humedad es mínima, hasta que no existe variación en la misma.

3.3.Resultados del proceso de hidrólisis enzimática

En la tabla III-7 se presentan los datos de la medición de la concentración de sólidos solubles (°Brix) de los hidrolizados de cascarilla de arroz, obtenidos de la parte experimental, así como sus respectivas réplicas.

Tabla III-7: Resultados de la Concentración de Sólidos Solubles (°Brix) del proceso de hidrólisis enzimática

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Tiempo de Hidrólisis (h)	Concentración de sólidos solubles (°Brix)
1	4	40	24	11,3
2	5	40	24	12,7
3	4	50	24	12,5
4	5	50	24	14,9
5	4	40	48	12,2
6	5	40	48	13,0
7	4	50	48	14,1
8	5	50	48	15,6
9	4	40	24	11,1
10	5	40	24	12,5
11	4	50	24	12,2
12	5	50	24	14,6
13	4	40	48	11,8
14	5	40	48	12,9
15	4	50	48	13,4
16	5	50	48	15,3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Se puede observar que los °Brix oscilan entre 11.1 y 15.6, siendo las muestras 8 y 16 las que tienen los valores más altos, 15.6 y 15.3 respectivamente, lo que significa que contienen mayor presencia de azúcares en relación a las otras muestras.

En la tabla III-8, se presentan los resultados del porcentaje de azúcares reductores obtenidos del hidrolizado de cascarilla de arroz conseguido en la parte experimental y analizados por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), así como sus respectivas réplicas, extraída del informe de los resultados de análisis de dichas muestras (Ver ANEXO B).

Tabla III-8: Resultados del porcentaje de azúcares reductores del proceso de hidrólisis enzimática

Muestra	% Azúcares Reductores
1	5,65
2	6,31
3	6,72
4	7,37
5	6,75
6	6,72
7	7,63
8	8,18
9	5,41
10	6,17
11	6,43
12	6,95
13	6,65
14	6,69
15	7,18
16	7,39

Fuente: CEANID, 2023.

En la tabla III-8 se puede notar que el porcentaje de azúcares reductores oscila entre 5.41% y 8.18%, siendo las muestras 8 y 16 las que tienen un mayor porcentaje, 8.18% y 7.39% respectivamente, las cuales confirman los valores de °Brix señalados anteriormente. Asimismo, se demuestra la posibilidad de obtener azúcares mediante hidrólisis enzimática de la cascarilla de arroz.

3.4.Diseño Factorial

Para valorar los resultados del diseño factorial se usarán los datos recolectados y un programa de análisis estadístico.

3.4.1. Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de hidrólisis enzimática

El análisis estadístico se realizó mediante el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 29.0; el cual permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera los resultados más significativos y confiables.

Con el análisis de varianza ANOVA se determina la influencia de los factores pH, temperatura, tiempo y sus respectivas interacciones sobre la variable respuesta (Concentración de sólidos solubles °Brix).

En la tabla III-9, se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado, cada factor tiene un nivel superior (+1) y un nivel inferior (-1).

Tabla III-9: Matriz de diseño experimental en la etapa de hidrólisis enzimática

Muestra	Factores			Variable Respuesta
	pH	Temperatura (°C)	Tiempo de Hidrólisis (h)	Concentración de sólidos solubles (°Brix)
1	-1	-1	-1	11,3
2	+1	-1	-1	12,7
3	-1	+1	-1	12,5
4	+1	+1	-1	14,9
5	-1	-1	+1	12,2
6	+1	-1	+1	13,0
7	-1	+1	+1	14,1
8	+1	+1	+1	15,6
9	-1	-1	-1	11,1
10	+1	-1	-1	12,5
11	-1	+1	-1	12,2
12	+1	+1	-1	14,6
13	-1	-1	+1	11,8
14	+1	-1	+1	12,9
15	-1	+1	+1	13,4
16	+1	+1	+1	15,3

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-10, se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta de °Brix, tomando en cuenta los factores de pH, temperatura y tiempo, así como sus interacciones.

Tabla III-10: Análisis de Varianza ANOVA en la etapa de hidrólisis enzimática

Origen	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	28,614 ^a	6	4,769	82,441	0,000
Intersección	2758,876	1	2758,876	47692,448	0,000
pH	10,401	1	10,401	179,795	0,000
Temperatura	14,251	1	14,251	246,349	0,000
Tiempo	2,641	1	2,641	45,648	0,000
pH * Temperatura	0,766	1	0,766	13,235	0,005
pH * Tiempo	0,331	1	0,331	5,715	0,041
Temperatura * Tiempo	0,226	1	0,226	3,900	0,080
Error	0,521	9	0,058		
Total	2788,010	16			
Total corregido	29,134	15			

a. R al cuadrado = ,982 (R al cuadrado ajustada = ,970)

Fuente: Elaboración propia SPSS 29.0, 2023.

Las variables más significativas son las que poseen un nivel de confianza de 95%, o que es lo mismo, cuando los valores de significancia son menores a 0,05.

Se puede observar que la interacción Temperatura*Tiempo tiene un nivel de significancia igual a 0,080, quedando descartada, porque no cumple con el requisito del valor menor a 0.05.

Según el análisis de varianza, se puede verificar que a un nivel de significancia 5%, las variables pH, temperatura, tiempo, pH*Tiempo y pH*Temperatura, cumplen con el requisito (menor al 0.05).

3.4.2. Análisis de regresión lineal en la etapa de hidrólisis enzimática

Establecido lo anterior, se procede a realizar la regresión lineal.

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuesta, en la tabla III-12, se muestran los resultados de los coeficientes del modelo de la regresión lineal.

Tabla III-11: ANOVA Datos y Resultados Obtenidos Aplicando Regresión Lineal en la Hidrólisis Enzimática

Modelo	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	27,623	4	6,906	50,243	,000 ^b
Residuo	1,512	11	0,137		
Total	29,134	15			

a. Variable dependiente: Brix
b. Predictores: (Constante), pHTiempo, Tiempo, Temperatura, pH

Fuente: Elaboración propia SPSS 29.0, 2023.

Tabla III-12: Coeficiente del Modelo

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	13,131	0,068		192,275	0,000	12,979	13,283
pH	0,806	0,068	0,597	11,806	0,000	0,654	0,958
Temperatura	0,944	0,068	0,699	13,819	0,000	0,792	1,096
Tiempo	0,406	0,068	0,301	5,949	0,000	0,254	0,558
pHTemperatura	0,219	0,068	0,162	3,203	0,009	0,067	0,371
pHTiempo	-0,144	0,068	-0,107	-2,105	0,062	-0,296	0,008

a. Variable dependiente: Brix

Fuente: Elaboración propia SPSS 29.0, 2023.

Los resultados de la tabla III-12; establecen los coeficientes de los efectos en el modelo, no obstante, el nivel de significancia de la interacción factor pH*Tiempo es mayor a 0.05 por lo que se realiza nuevamente la regresión eliminando esta variable.

Tabla III-13: Coeficiente del Modelo Modificado

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B	
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	13,131	0,078		167,873	0,000	12,959	13,303
pH	0,806	0,078	0,597	10,307	0,000	0,634	0,978
Temperatura	0,944	0,078	0,699	12,065	0,000	0,772	1,116
Tiempo	0,406	0,078	0,301	5,194	0,000	0,234	0,578
pH*Temperatura	0,219	0,078	0,162	2,797	0,017	0,047	0,391

Fuente: Elaboración propia, SPSS 29.0, 2023.

Los resultados de la tabla III-13; establecen los coeficientes de los efectos del modelo, en la cual todas las variables muestran un nivel de significancia menor a 0,05 por lo tanto todas son aceptables, así que el modelo resulta en:

$$\%Brix = 13.131 + 0.806pH + 0.944T + 0.406t + 0.219pH t \quad \text{Ecuación (3-2)}$$

Donde:

T=Temperatura

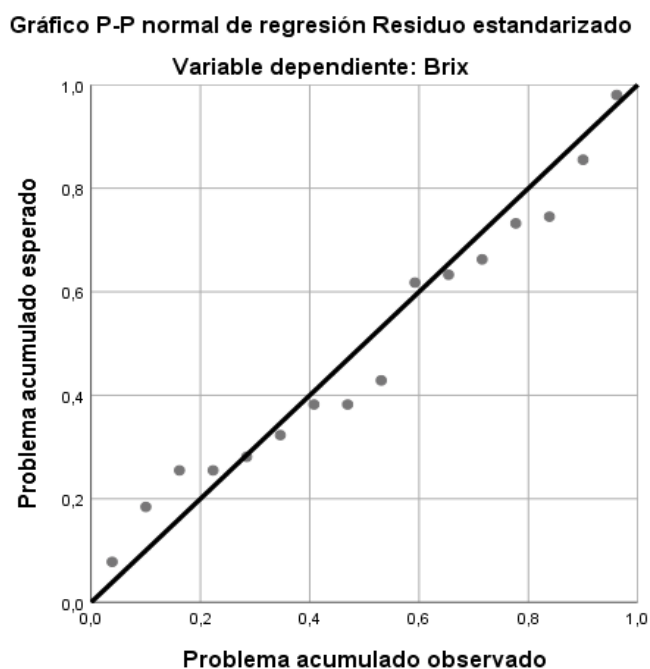
t= tiempo

pH-t= pH-Tiempo

A partir de esta ecuación se puede enunciar que, a pH más básicos, mayores temperaturas y tiempos, mayor es el porcentaje de °Brix, todo esto relacionado en el proceso de hidrólisis enzimática.

En la figura 3-3, se puede observar el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo, algunos puntos no se ajustan al modelo, sin embargo, según el análisis ANOVA no muestra significancia en el desajuste, motivo por el cual el modelo escogido es correcto.

Figura 3-3: Modelo Lineal



Fuente: Elaboración propia SPSS 29.0, 2023.

3.5.Resultados obtenidos en la elaboración del sustrato para fermentación

3.5.1. Resultados en la obtención del sustrato seco

Como se explicó en el capítulo anterior, una vez conocidas las mejores condiciones de trabajo, se procedió a la obtención de las cantidades requeridas de materia prima acondicionada y pretratada para realizar la hidrólisis enzimática y posteriormente ejecutar la fermentación alcohólica. Los resultados obtenidos de la obtención del sustrato seco para ser utilizado en la hidrólisis enzimática se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III-14: Resultados de la obtención del sustrato seco

Cascarilla de Arroz	Peso (g)
Molienda	1350
Tamizado	923
Pretratamiento	508

Fuente: Elaboración propia, 2023.

3.5.2. Resultados de la hidrólisis enzimática en la obtención del sustrato para fermentación

Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizó un experimento y su repetición, para lo cual se seleccionó el experimento que mejores resultados mostró en la ejecución del diseño experimental, el cual fue el experimento 8 y su respectiva repetición que es el experimento 16; se preparó 10 litros de hidrolizado utilizando 500 gramos de sustrato seco; los resultados de la hidrólisis se muestran a continuación:

Tabla III-15: Resultados de la hidrólisis enzimática en la obtención del sustrato para fermentación

Prueba	pH	Temperatura (°C)	Tiempo de Hidrólisis (h)	Concentración de sólidos solubles (°Brix)
1	5	50	48	15,3
2	5	50	48	15,2

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los sustratos obtenidos alcanzaron de manera aproximada la cantidad de °Brix establecida anteriormente en el diseño factorial (Ver tabla III-7), los cuales son 15,3 y 15,2; notándose un ligero descenso en los mismos con relación a los anteriores experimentos realizados en iguales condiciones de trabajo.

3.6. Resultados del proceso de fermentación alcohólica

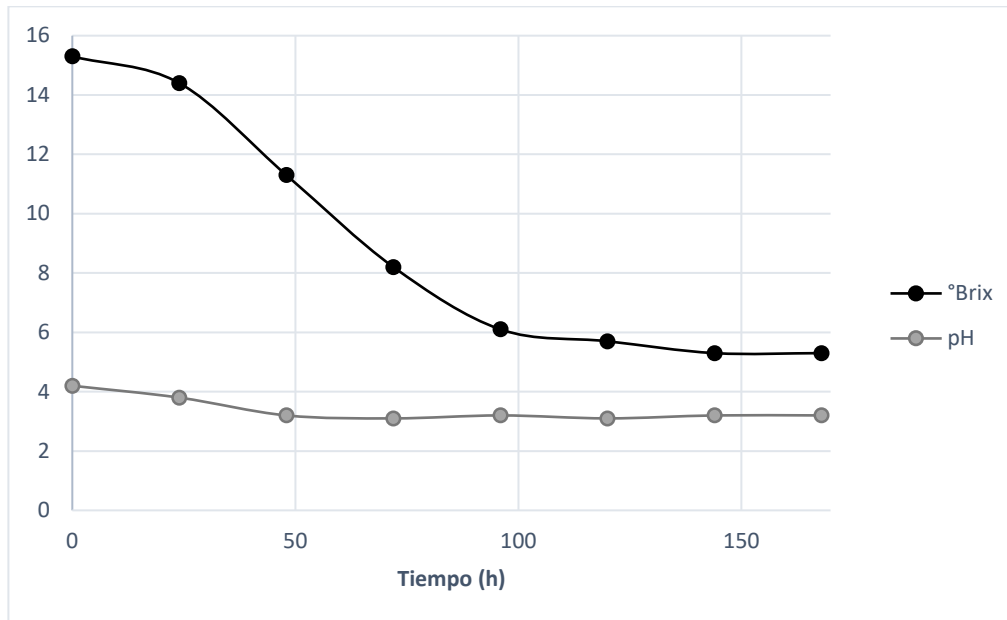
En la tabla III-16; se muestra la variación de los °Brix y pH respecto al tiempo para las dos pruebas realizadas. Se puede apreciar que la fermentación se desarrolló por 7 días, llevándose a cabo una disminución de los °Brix y pH hasta permanecer constantes.

Tabla III-16: Medición de los °Brix y pH en la fermentación

Tiempo (h)	Prueba 1		Prueba 2	
	°Brix	pH	°Brix	pH
0	15,3	4,2	15,2	4,3
24	14,4	3,8	14,1	4,0
48	11,3	3,2	11,8	3,3
72	8,2	3,1	9,0	3,0
96	6,1	3,2	7,6	3,1
120	5,7	3,1	6,8	3,4
144	5,3	3,2	6,1	3,2
168	5,3	3,2	6,1	3,2

Fuente: Elaboración propia, 2023.

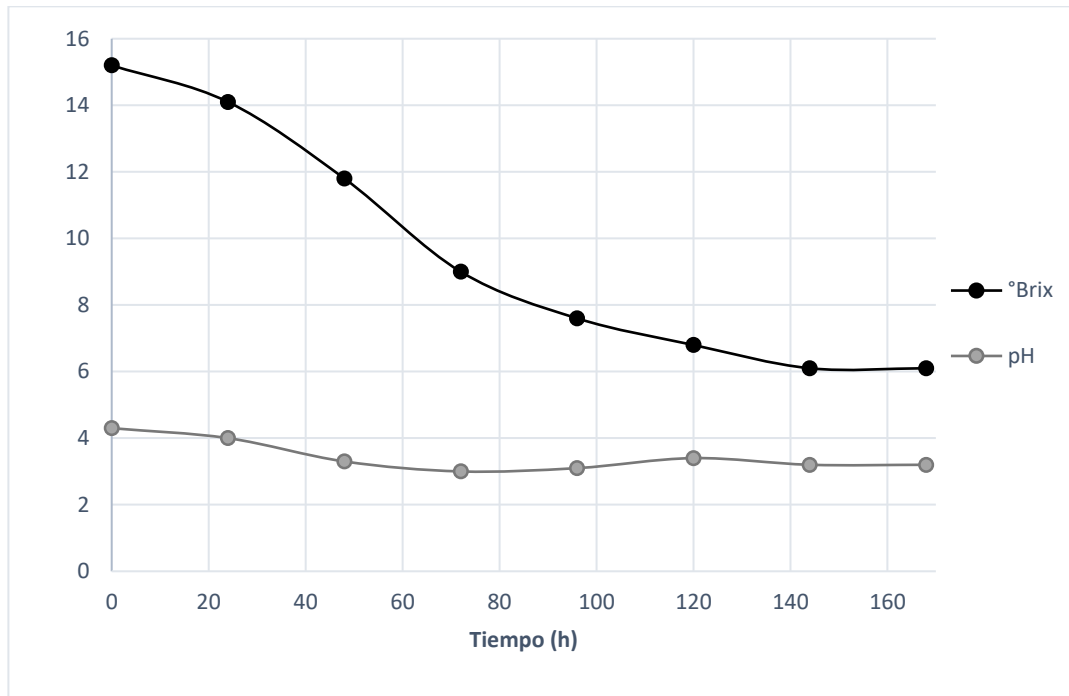
En la figura 3-4, se muestra la variación de los °Brix y pH en función del tiempo para la prueba 1. Esta prueba parte con un °Brix igual a 15.3; respecto va pasando el tiempo se observa que estos van reduciendo considerablemente debido al consumo de los azúcares por parte de la levadura, hasta que se mantienen constantes, concluyendo con la etapa de fermentación alcohólica con un °Brix igual a 5.3. Asimismo, el pH va disminuyendo a medida que avanza la fermentación, cuando este tuvo una variación significativa se lo reguló haciendo uso de una base débil.

Figura 3-4: Prueba 1, tiempo vs °Brix, pH.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la figura 3-5, se muestra la variación de los °Brix y pH respecto al tiempo, de la prueba 2; esta prueba comienza con un °Brix de 15.2, posteriormente se observa una reducción de los mismos a medida que el proceso de fermentación va avanzando, hasta finalizar el mismo con un °Brix igual a 6.1. El pH va disminuyendo respecto pasa el tiempo, este se lo regula cuando sufre una reducción significativa.

Figura 3-5: Prueba 2, tiempo vs °Brix, pH.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

En las figuras anteriores, se puede observar el comportamiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en cuanto al consumo de los sustratos en el tiempo.

En los primeros días de la fermentación, se puede observar que el consumo del sustrato es más rápido, esto se da, debido a la disponibilidad de nutrientes y azúcares que tienen los sustratos preparados, lo cual provoca un crecimiento celular acelerado y la producción de etanol por parte de la levadura. En los últimos días se observa que las tendencias de las curvas tienden a mantenerse constantes, mostrando que la levadura está entrando en fase estacionaria, en la cual los microorganismos disminuyen su actividad debido a la disminución de los nutrientes y azúcares disponibles, esto se ve reflejado en la nula variación de los °Brix respecto al tiempo, lo cual nos indica la muerte de la levadura y el fin del proceso fermentativo.

3.6.1. Cinética de Fermentación

Para poder predecir la rapidez de desaparición o consumo de reactante, es decir el grado de influencia de los azúcares en la fermentación alcohólica se determinó la cinética química de la reacción a través del método integral (Levenspiel, 2000).

Para analizar los datos de velocidad por este método, buscamos la función apropiada de la concentración que corresponde a una ley de velocidad específica que sea lineal respecto al tiempo.

La ecuación diferencial de segundo orden será:

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad \text{Ecuación (3-3)}$$

Separando las variables:

$$-\frac{dC_A}{C_A^2} = k dt \quad \text{Ecuación (3-4)}$$

Donde:

$-r_A$ = velocidad de desaparición de la reacción fermentativa (g/ml.min).

k = constante cinética

C_A = concentración de reactante A (g/ml)

Integrando la ecuación (3-4) tenemos:

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^2} = k \int_0^t dt \quad \text{Ecuación (3-5)}$$

La ecuación integrada de la reacción de segundo orden queda:

$$\frac{1}{C_A} = \frac{1}{C_{A0}} + k \cdot t \quad \text{Ecuación (3-6)}$$

$$y = b + mx \quad \text{Ecuación (3-7)}$$

La ecuación (3-7) representa la ecuación de una recta.

Donde:

$$\frac{1}{C_A} = y$$

$$\frac{1}{C_{A0}} = b = \text{coeficiente de posición}$$

$$k = m = \text{pendiente}$$

$$t = x$$

Tabla III-17: Estadísticas de la Cinética de Fermentación

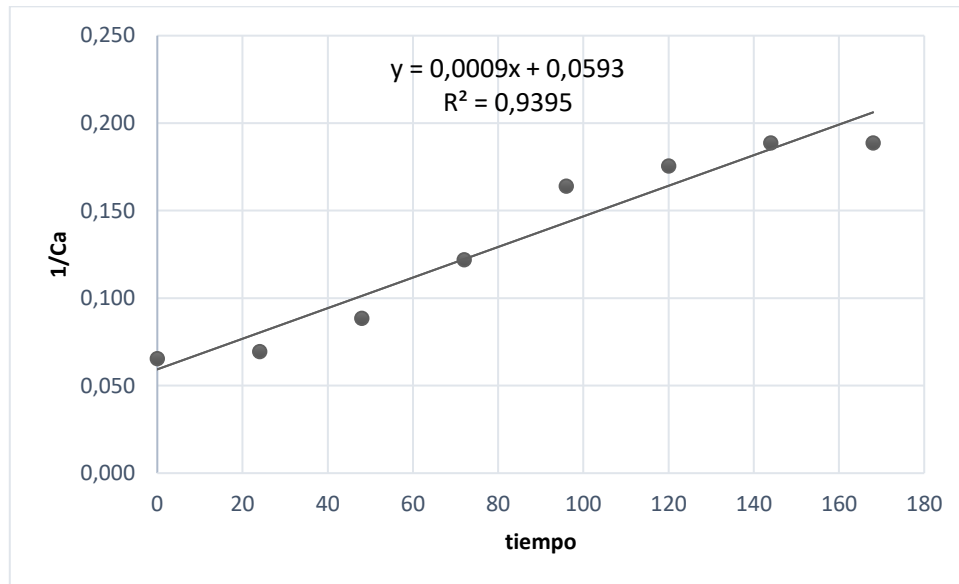
t (Horas)	Ca (°Brix)	$\frac{1}{C_a}$
0	15,3	0,065
24	14,4	0,069
48	11,3	0,088
72	8,2	0,122
96	6,1	0,164
120	5,7	0,175
144	5,3	0,189
168	5,3	0,189

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-17, se muestran los resultados del cálculo de las estadísticas para encontrar la pendiente y determinar la cinética de la etapa de fermentación alcohólica.

En la figura 3-6, se muestra la representación de la recta formada con las estadísticas de la cinética de fermentación para determinar la cinética en la fermentación alcohólica.

Figura 3-6: Lineación para determinar la cinética de fermentación alcohólica.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Reemplazando valores en la ecuación (3-7), se tiene:

$$y = 0,0009x + 0,0593$$

Sabiendo que:

$$b = \frac{1}{C_{A0}} = 0,0593$$

Calculando la pendiente de la figura 3-6 se tiene:

$$m = k = 8,74 \times 10^{-4}$$

Remplazando valores en la ecuación (3-3), tenemos:

$$(-r_A) = 8,74 \times 10^{-4} * C_a^2 \quad \text{Ecuación (3-8)}$$

La ecuación (3-8), representa el modelo matemático que rige la cinética de la fermentación alcohólica, con una constante de $8,74 \times 10^{-4}$, esta ecuación nos permite determinar la velocidad del proceso de fermentación en función de la disminución de °Brix.

4.1.Resultados de la destilación

Para determinar la cantidad de bioetanol producido en la etapa de fermentación, se procedió a realizar una destilación de las pruebas. El destilado obtenido es vertido en una probeta, y luego se le mide el grado alcohólico con ayuda de un alcoholímetro (Ver ANEXO C), posteriormente se recoge la muestra y se la envía al Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), para su respectivo análisis. En la tabla III-18, se muestra la cantidad y el grado alcohólico obtenido de cada prueba.

Tabla III-18: Cantidad y grado alcohólico del bioetanol recogido en la etapa de destilación

Muestra	Volumen de destilado (ml)	°G.L.
1	570	78
2	486	76

Fuente: Elaboración propia, 2023.

En la tabla III-19, se muestra el resultado del rendimiento de alcohol obtenido en la parte experimental (Ver ANEXO D).

Tabla III-19: Resultado del rendimiento del alcohol obtenido

Prueba	% Rendimiento
1	38,88
2	33,46

Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.1.1. Resultados de los análisis realizados al bioetanol obtenido

En la tabla III-20 se muestran los resultados de los análisis realizados al bioetanol obtenido por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), extraídos del informe de los resultados de análisis de dichas muestras (Ver ANEXO E).

Tabla III-20: Resultados de los análisis realizados al bioetanol obtenido

Análisis	Prueba 1	Prueba 2
Estado físico	Líquido	Líquido
Apariencia	Transparente	Transparente
Olor	Característico	Característico
Densidad relativa (g/ml)	0,8761	0,8784
Grado Alcohólico (% v/v)	78	76
Metanol (mg/L)	601	785

Fuente: Elaboración propia, 2023.

De los resultados obtenidos en los análisis realizados para el control de calidad de las muestras de bioetanol a partir de cascarilla de arroz, se puede concluir lo siguiente:

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados comparados con las Características Técnicas de calidad del Etanol Anhidro para uso como aditivo vegetal (Ver Tabla I-9) son desfavorables, debido a que el bioetanol obtenido tiene una concentración máxima de 78 %v/v.

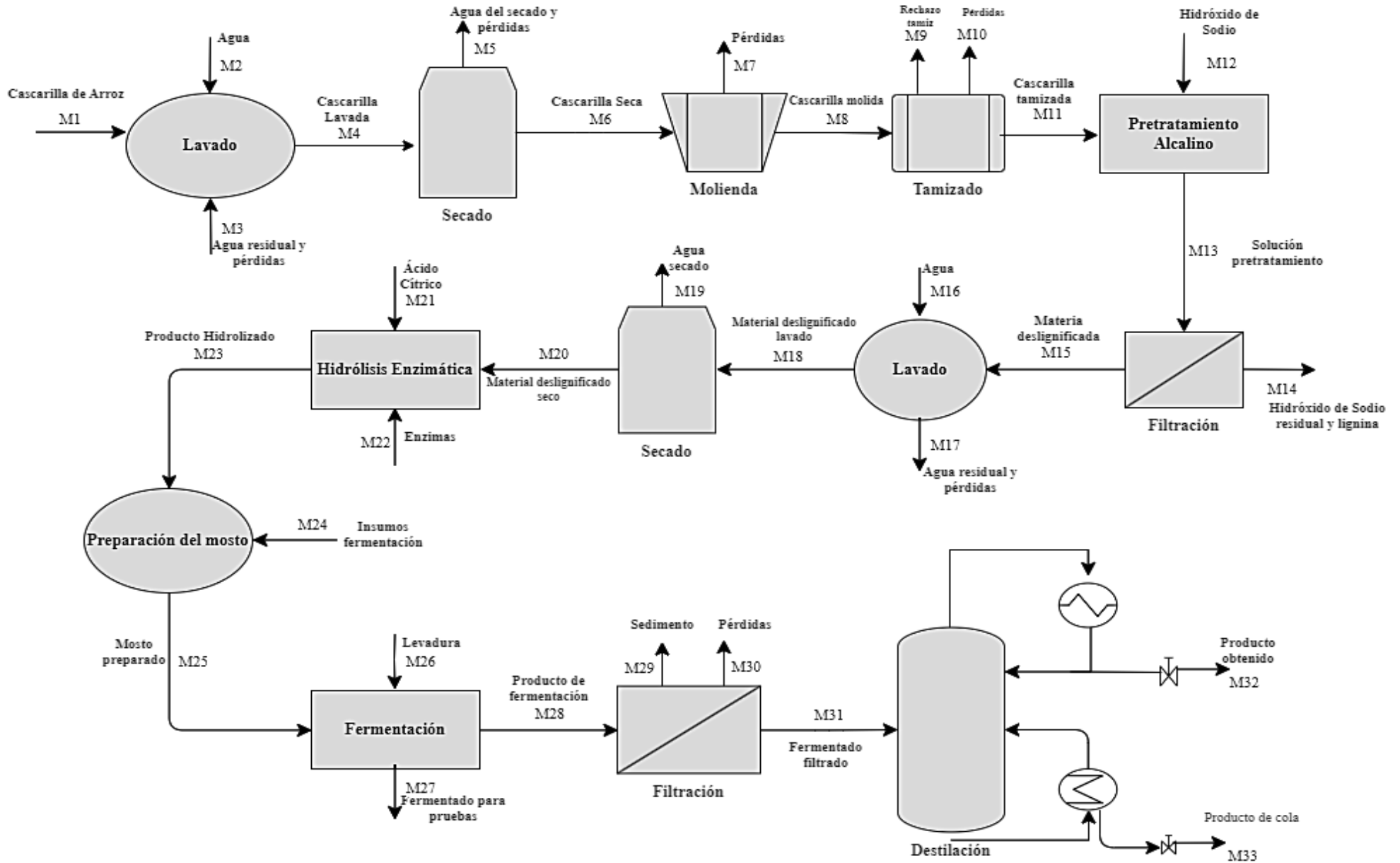
Sin embargo, los análisis fisicoquímicos realizados responden de manera positiva comparándolos con las características del bioetanol usado como desinfectante (Ver tabla I-10) cumpliendo favorablemente con las características especificadas para este propósito.

4.2. Balance de Materia para la obtención de bioetanol de cascarilla de arroz

En la figura 3-7 se muestra el diagrama de balance de materia general para la producción de bioetanol a partir de cascarilla de arroz a nivel laboratorio.

Para obtener bioetanol de la cascarilla de arroz se dividió en cinco partes: acondicionamiento de la materia prima, pretratamiento alcalino, hidrólisis enzimática, fermentación alcohólica y destilación

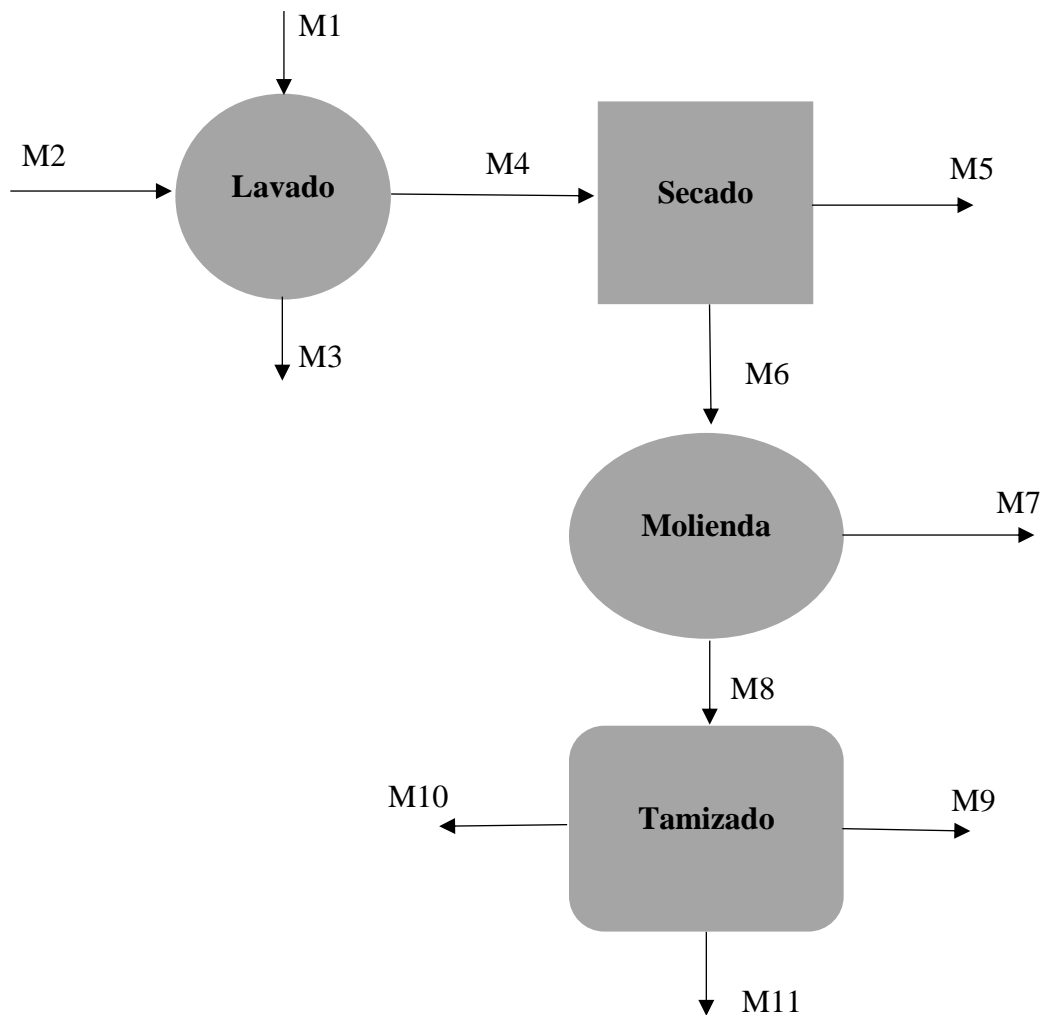
Figura 3-7: Diagrama de balance de materia general para la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz



4.2.1. Balance de materia en el acondicionamiento de la materia prima

El balance de materia del proceso de acondicionamiento de la materia prima, se realizó para una base de cálculo de 1,750 kg de cascarilla de arroz y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-8.

Figura 3-8: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

M1 = Cantidad de cascarilla de arroz (kg).

M2 = Cantidad de Agua (kg).

M3 = Cantidad de agua residual y pérdidas (kg).

M4 = Cantidad de cascarilla de arroz lavada (kg).

M5 = Cantidad de agua del secado y pérdidas (kg).

M6 = Cantidad de cascarilla de arroz seca (kg).

M7 = Pérdidas en la molienda (kg).

M8 = Cantidad de cascarilla de arroz molida (kg).

M9 = Cantidad de rechazo del tamiz (kg).

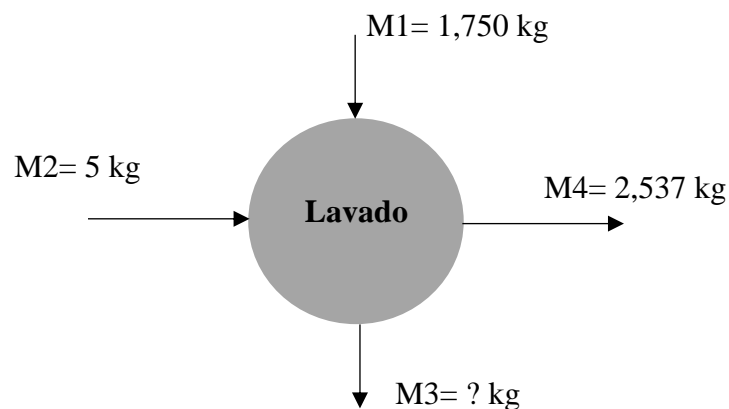
M10 = Pérdidas en el tamizado (kg).

M11 = Cantidad de cascarilla de arroz tamizada (kg).

4.2.1.1. Balance de materia en la etapa de lavado

La figura 3-9 muestra el proceso de balance de materia en la etapa de lavado, partiendo de 1.750 kg de cascarilla de arroz para realizar el balance de materia.

Figura 3-9: Balance de materia en la etapa de lavado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de lavado de la cascarilla de arroz:

$$M1 + M2 = M3 + M4 \quad \text{Ecuación (3-9)}$$

Despejando la ecuación (3-9):

$$M3 = M1 + M2 - M4$$

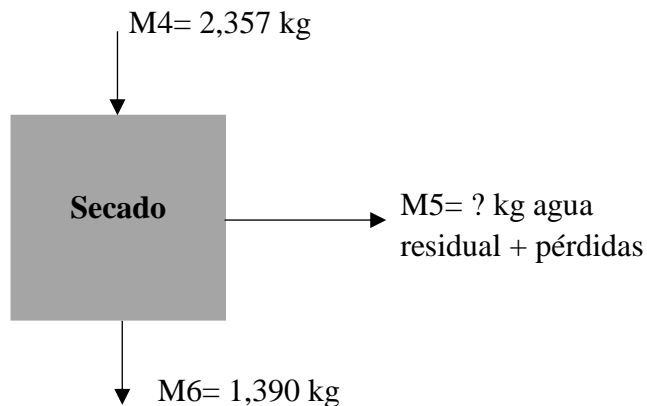
$$M3 = 1,750kg + 5 - 2,357kg$$

$$M3 = 3,393 \text{ kg de agua y pérdidas}$$

4.2.1.2. Balance de materia en la etapa de secado

En la figura 3-10 se muestra el proceso de balance de materia en la etapa de secado de la cascarilla de arroz lavada.

Figura 3-10: Balance de materia en la etapa de secado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de secado de la cascarilla de arroz:

$$M4 = M5 + M6 \quad \text{Ecuación (3-10)}$$

Despejando la ecuación (3-10):

$$M5 = M4 - M6$$

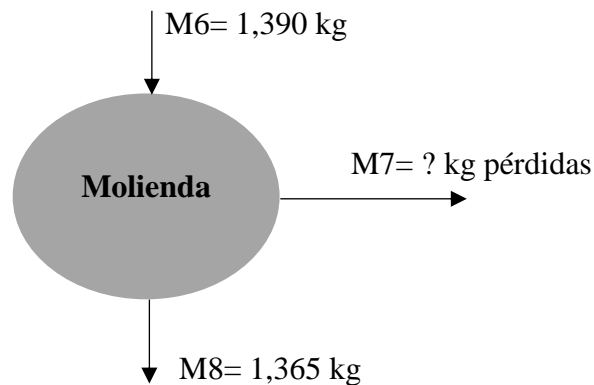
$$M5 = 2,357kg - 1,390kg$$

$$M5 = 0,967 \text{ kg de agua y pérdidas}$$

4.2.1.3. Balance de materia en la etapa de molienda

En la figura 3-11, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa de molienda de la cascarilla de arroz.

Figura 3-11: Balance de materia en la etapa de molienda



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de molienda de la cascarilla de arroz:

$$M6 = M7 + M8 \quad \text{Ecuación (3-11)}$$

Despejando la ecuación (3-11):

$$M7 = M6 - M8$$

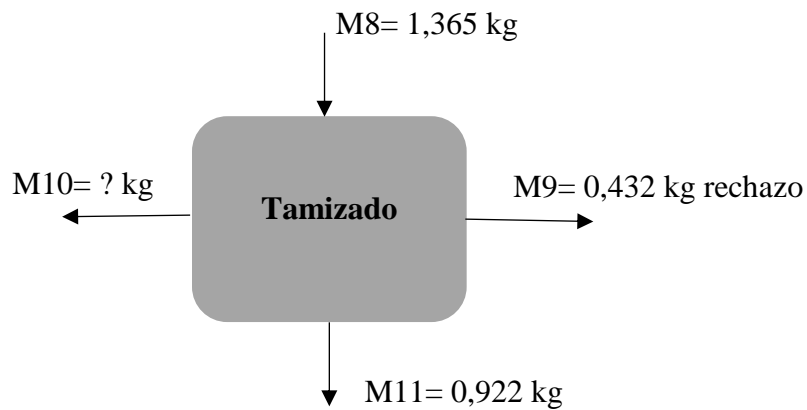
$$M7 = 1,390 \text{ kg} - 1,365 \text{ kg}$$

$$M7 = 0,025 \text{ kg pérdidas}$$

4.2.1.4. Balance de materia en la etapa de tamizado

La figura 3-12 muestra el proceso de balance de materia en la etapa de tamizado, partiendo de 1,365 kg de cascarilla de arroz molida.

Figura 3-12: Balance de materia en la etapa de tamizado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de tamizado de la cascarilla de arroz:

$$M8 = M9 + M10 + M11 \quad \text{Ecuación (3-12)}$$

Despejando la ecuación (3-12):

$$M10 = M8 - M9 - M11$$

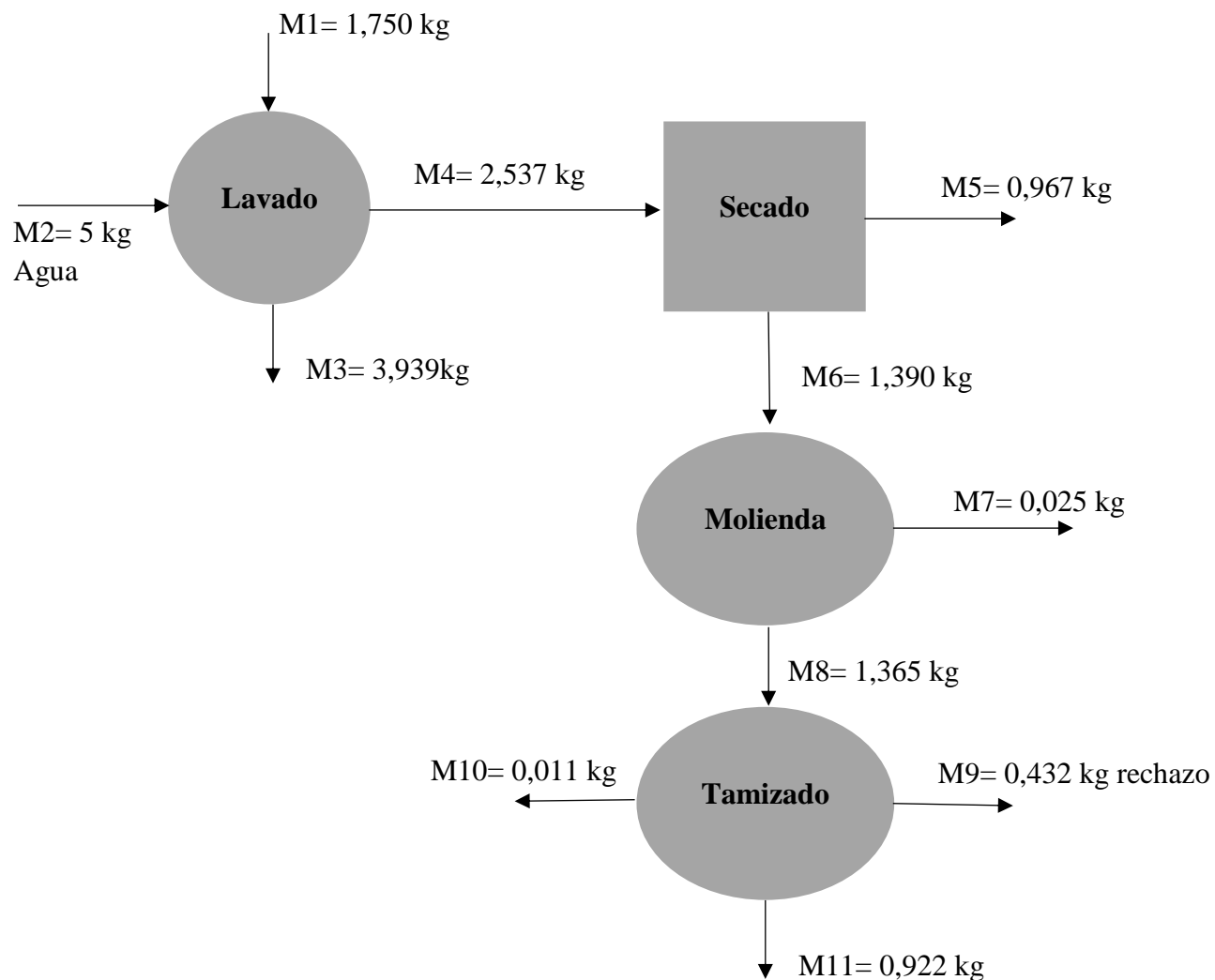
$$M10 = 1,365kg - 0,432kg - 0,922kg$$

$$M10 = 0,011 \text{ kg pérdidas}$$

4.2.2. Resumen general de balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima

En la figura 3-13, se muestra el resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima.

Figura 3-13: Resumen general balance de materia en la etapa de acondicionamiento de materia

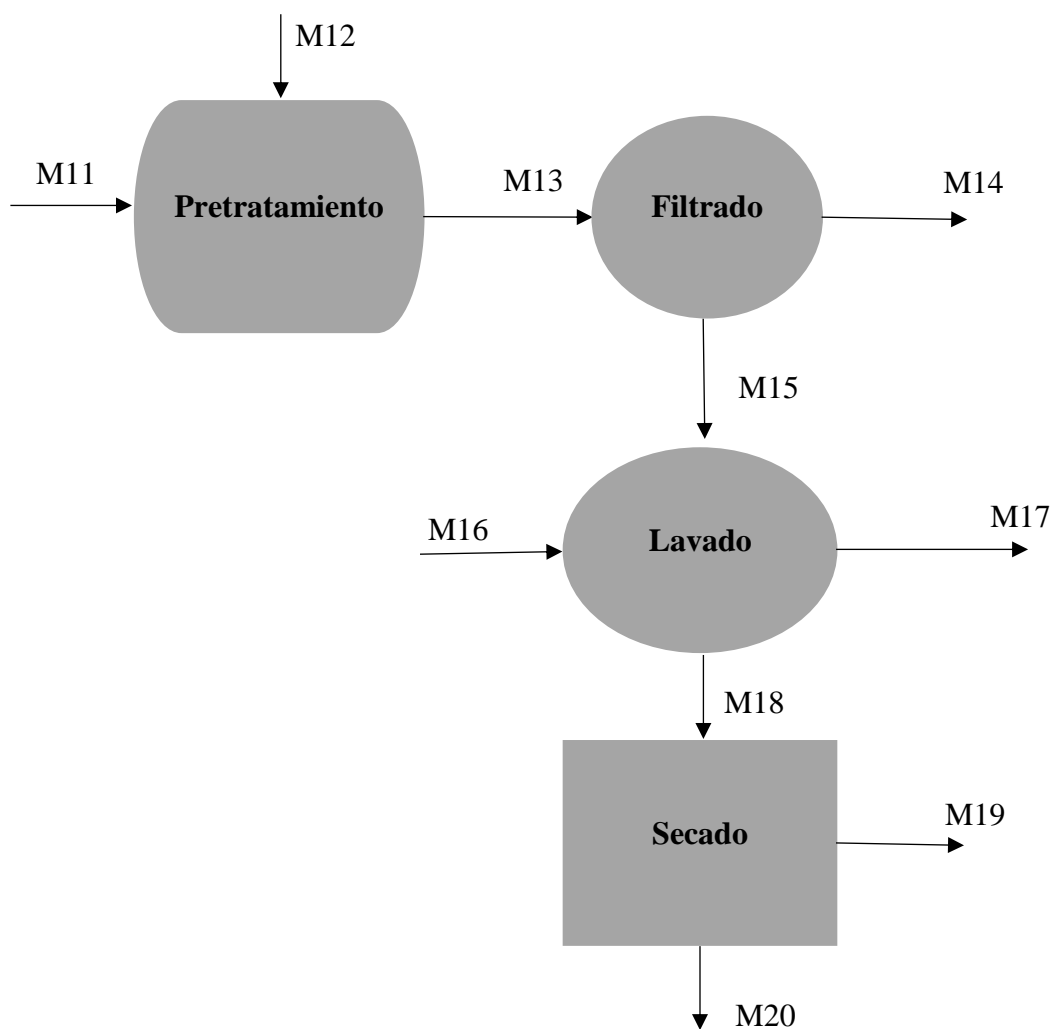


Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.2.3. Balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino

El balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino se realizó para una base de cálculo de 0,922 kg de cascarilla de arroz tamizada con tamaño de partícula 0.25 y 0.5 mm, su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-14.

Figura 3-14: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de pretratamiento alcalino



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

M11= Cantidad de cascarilla de arroz tamizada (kg).

M12= Cantidad de Hidróxido de Sodio 2 N (kg).

M13= Solución pretratamiento (kg).

M14= Cantidad de Hidróxido de Sodio residual y lignina (kg).

M15= Cantidad de materia deslignificada (kg)

M16= Cantidad de agua (kg).

M17= Cantidad de agua residual y pérdidas (kg).

M18= Cantidad de material deslignificado lavado (kg).

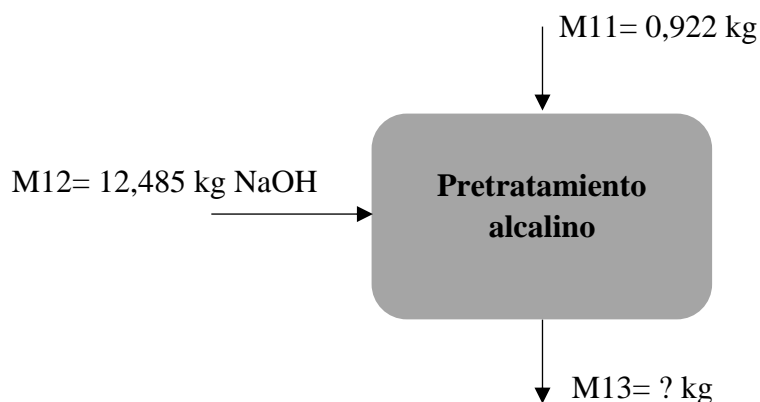
M19= Cantidad de agua de secado (kg).

M20= Cantidad de material deslignificado seco (kg).

4.2.3.1. Balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino

En la figura 3-15, se muestra el balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino de la cascarilla de arroz.

Figura 3-15: Balance de materia en la etapa de pretratamiento



Fuente: Elaboración propia, 2023.

La corriente M12 está compuesta por solución de hidróxido de sodio 2 N, este tiene una densidad de 1,09 kg/litro.

$M12 = 11,45 \text{ litros} \times 1,09 \text{ kg/litro} = 12,485 \text{ kg}$.

Balance de materia global en la etapa de pretratamiento de la cascarilla de arroz:

$$M11 + M12 = M13 \quad \text{Ecuación (3-13)}$$

Despejando la ecuación (3-13):

$$M_{11} = M_{12} + M_{13}$$

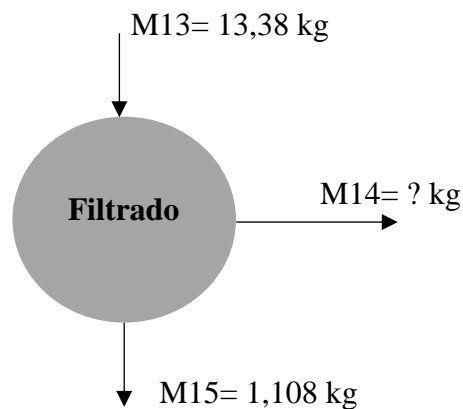
$$M_{13} = 12,485\text{kg} - 0,922\text{kg}$$

$$M_{13} = 13,38 \text{ kg solución pretratamiento}$$

4.2.3.2. Balance de materia en la etapa de filtrado

En la figura 3-16, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa de filtrado del pretratamiento alcalino de la cascarilla de arroz.

Figura 3-16: Balance de materia en la etapa de filtrado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de filtrado del pretratamiento alcalino de la cascarilla de arroz:

$$M_{13} = M_{14} + M_{15} \quad \text{Ecuación (3-14)}$$

Despejando la ecuación (3-14):

$$M_{14} = M_{13} - M_{15}$$

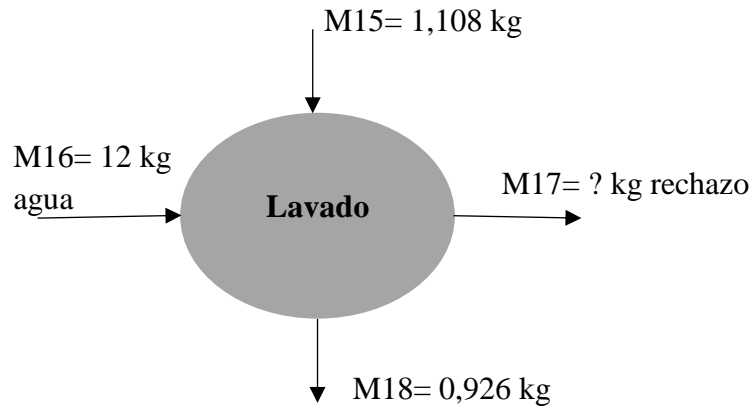
$$M_{14} = 13,380\text{kg} - 1,108\text{kg}$$

$$M_{14} = 12,272 \text{ kg solución pretratamiento}$$

4.2.3.3. Balance de materia en la etapa de Lavado

La figura 3-17 muestra el proceso de balance de materia en la etapa de lavado.

Figura 3-17: Balance de materia en la etapa de lavado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de secado de la cascarilla de arroz:

$$M15 = M9 + M10 + M11 \quad \text{Ecuación (3-15)}$$

Despejando la ecuación (3-15):

$$M10 = M8 - M9 - M11$$

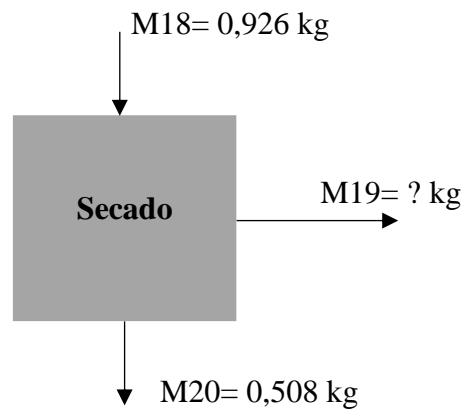
$$M10 = 1,365kg - 0,432kg - 0,922kg$$

$$M10 = 0,011 kg \text{ pérdidas}$$

4.2.3.4. Balance de materia en la etapa de secado

En la figura 3-18, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa de secado de la cascarilla de arroz deslignificada.

Figura 3-18: Balance de materia en la etapa de filtrado



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de secado de la cascarilla de arroz deslignificada:

$$M18 = M19 + M20 \quad \text{Ecuación (3-16)}$$

Despejando la ecuación (3-16):

$$M19 = M18 - M20$$

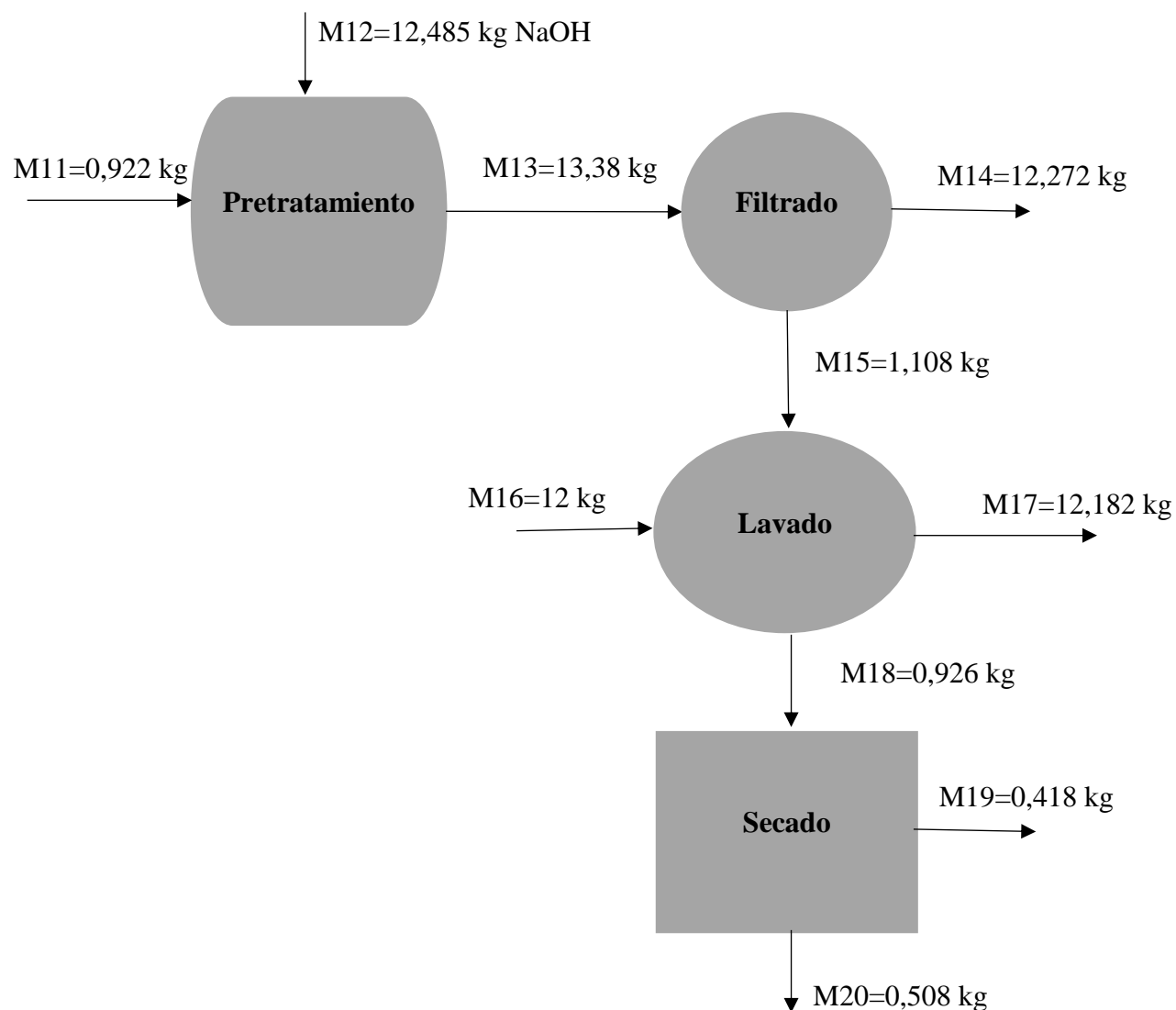
$$M19 = 0,926kg - 0,508kg$$

$$M13 = 0,418 \text{ kg material deslignificado seco}$$

4.2.4. Resumen general balance de materia en la etapa de pretratamiento

En la figura 3-19, se muestra el resumen general del balance de materia para el pretratamiento alcalino de la cascarilla de arroz:

Figura 3-19: Resumen general balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino

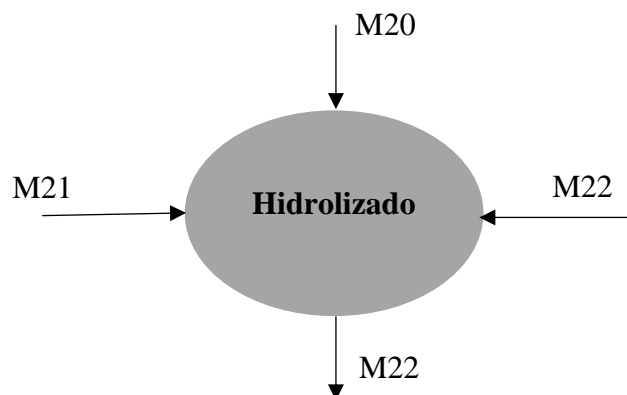


Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.2.5. Balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática

El balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática se realizó para una base de cálculo de 0,508 kg de cascarilla de arroz deslignificada seca procedente de la etapa de pretratamiento y 10 litros de ácido cítrico con pH=5, su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-20.

Figura 3-20: Diagrama de flujo del balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

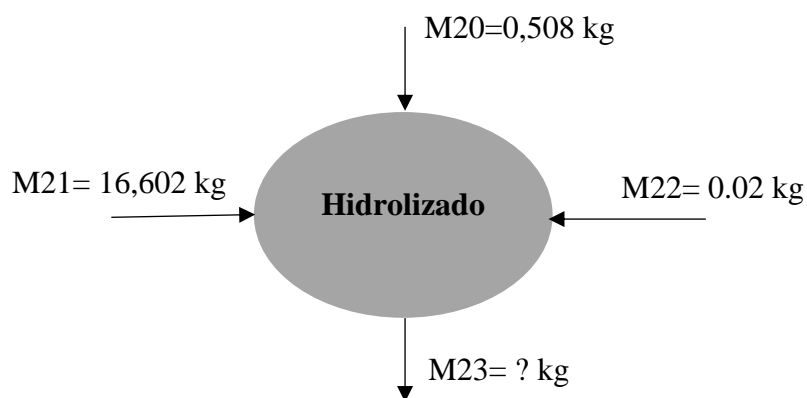
M20= Cantidad de material deslignificado seco (kg).

M21= Cantidad de Ácido Cítrico pH=5 (kg).

M22= Cantidad de enzimas (kg).

M23= Cantidad de producto hidrolizado (kg).

Figura 3-21: Balance de materia en la etapa de Hidrólisis enzimática



Fuente: Elaboración propia, 2023.

$M21 = \text{Cantidad de ácido cítrico (kg)} = 10 \text{ litros} * 1,66 \text{ kg/litro} = 16,6 \text{ kg}$.

Cabe mencionar que la corriente M21 está compuesta por ácido cítrico con una densidad de 1,66kg/litro y 0.002 kg de metabisulfito de potasio por lo que quedaría un total de $M21 = 16.602 \text{ kg}$.

Además, la corriente M22 está compuesta por 0.01 kg de enzima α amilasa y 0,01 kg de enzima β -glucosidasa cantidades que se utilizaron según especificación del fabricante.

Balance de materia global en la etapa de hidrólisis enzimática:

$$M20 + M21 + M22 = M23 \quad \text{Ecuación (3-17)}$$

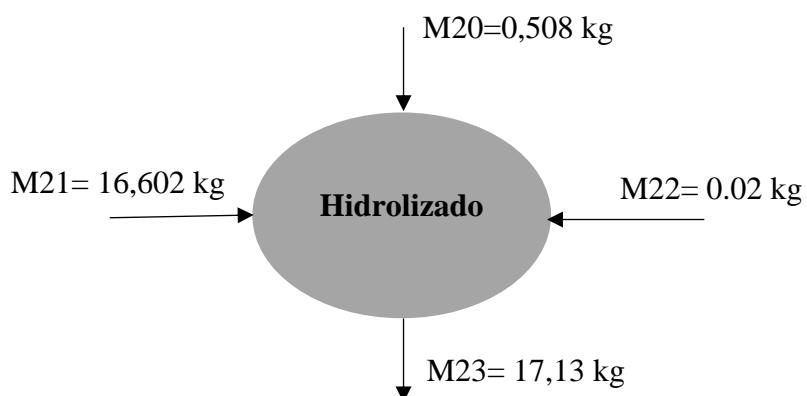
$$M23 = 0,508 \text{ kg} + 16,602 + 0,02 \text{ kg}$$

$$M23 = 17,13 \text{ kg producto hidrolizado}$$

4.2.6. Resumen general de balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática

En la figura 3-22, se muestra el resumen general del balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática:

Figura 3-22: Resumen general de balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática

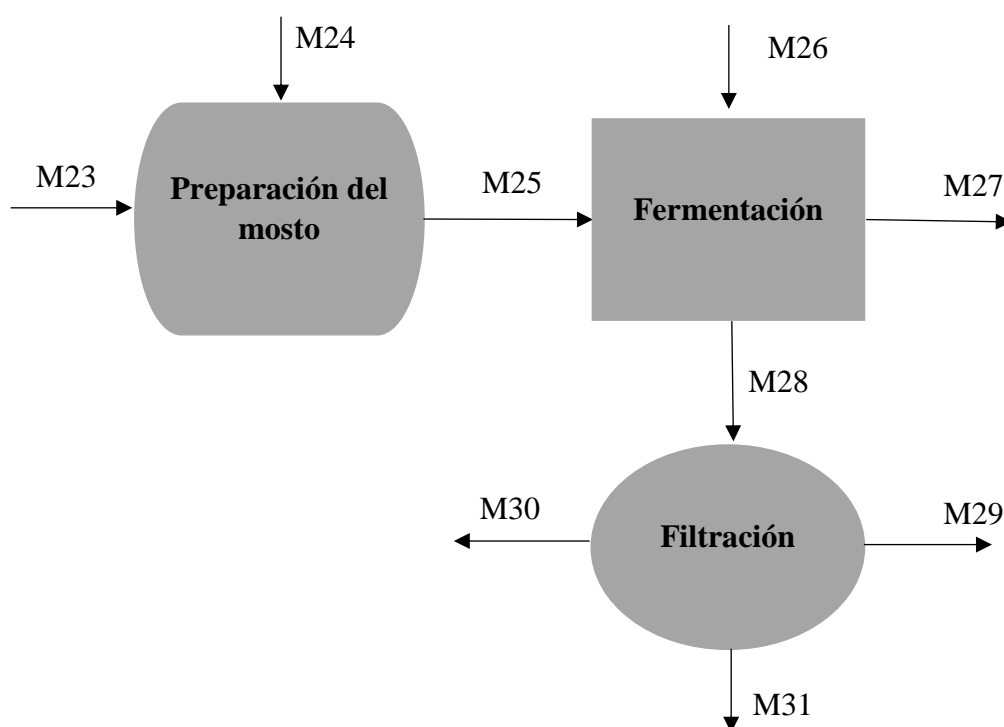


Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.2.7. Balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica

El balance de materia en la etapa de fermentación se realizó para una base de cálculo de 17,13 kg de producto hidrolizado, su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3-23.

Figura 3-23: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de pretratamiento alcalino



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

M23= Cantidad de producto hidrolizado (kg).

M24= Cantidad de insumos para la fermentación (kg).

M25= Cantidad de mosto preparado (kg).

M26= Cantidad de levadura activada (kg).

M27= Cantidad de fermentado para medición de °Brix y pH (kg).

M28= Cantidad de producto de la fermentación alcohólica (kg).

M29= Cantidad de sedimento de filtración (kg).

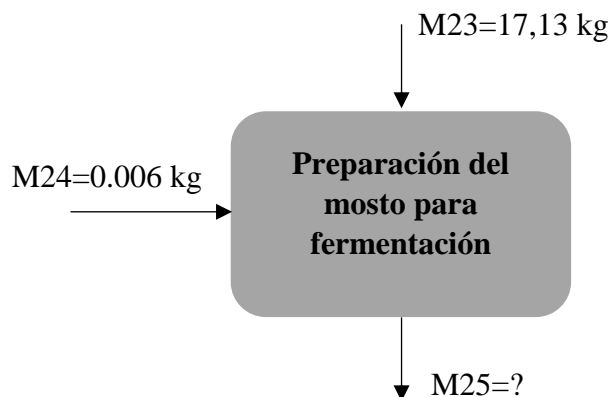
M30= Cantidad de pérdidas en la filtración (kg).

M31= Cantidad de fermentado filtrado (kg).

4.2.7.1. Balance de materia en la etapa de preparación del mosto para fermentación

En la figura 3-24, se muestra el balance de materia en la etapa de preparación del mosto para fermentación de la cascarilla de arroz.

Figura 3-24: Balance de materia en la etapa de preparación del mosto para fermentación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Balance de materia global en la etapa de pretratamiento de la cascarilla de arroz:

$$M23 + M24 = M25 \quad \text{Ecuación (3-18)}$$

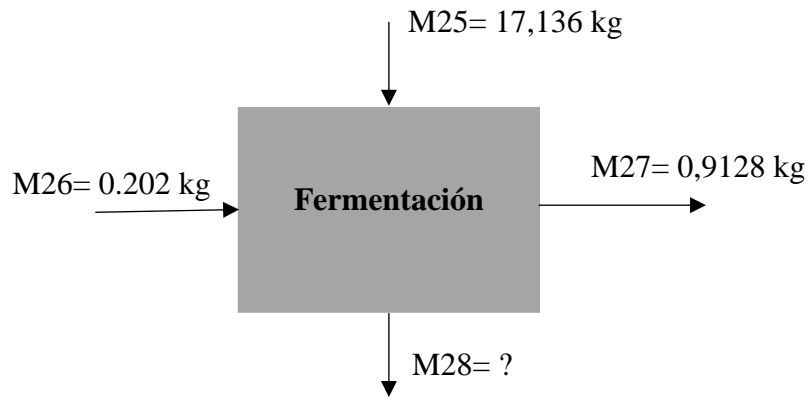
$$M25 = 17,13kg - 0,006kg$$

$$M25 = 17,136 kg$$

4.2.7.2. Balance de materia en la etapa de fermentación

En la figura 3-25, se muestra el balance de materia en la etapa de fermentación:

Figura 3-25: Balance de materia en la etapa de fermentación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

La corriente M27 es la cantidad de muestra que se retiró para realizar las mediciones de control de °Brix y pH, la densidad calculada para el fermentado es de 1,141 kg/litro (ver ANEXO F).

M27= Cantidad de fermentado para pruebas (kg)= 0,8 litro*1,141 kg/litro= 0,9128 kg.

Balance de materia global en la etapa de fermentación de la cascarilla de arroz:

$$M25 + M26 = M27 + M28 \quad \text{Ecuación (3-19)}$$

Despejando la ecuación (3-19):

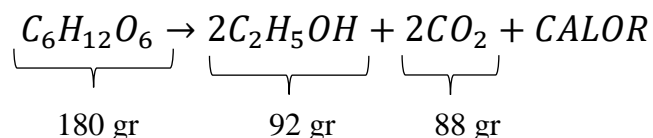
$$M28 = M25 + M26 - M27$$

$$M28 = 17,136kg + 0,202kg - 0,9128kg$$

$$M28 = 16,425 kg$$

4.2.7.2.1. Cantidad de dióxido de carbono desprendido en el proceso de fermentación

Para calcular la masa de CO₂ desprendido del proceso de fermentación se debe conocer el rendimiento de la fermentación alcohólica para ello se procedió a realizar un cálculo de estequiometría aplicando la ley de conservación de la masa en una reacción química.



Por bibliografía se conoce que 1 °Brix es igual a 1 gramo de sacarosa en 100 gr de solución.

La corriente M28 es igual a 16,425 kg de fermentado, lo que es igual a 16425 g, este fermentado tiene una concentración de sólidos solubles (°Brix) igual a 15,3 (Ver tabla III-15).

Calculamos la cantidad de sacarosa en el fermentado:

$$m_{\text{sacarosa en el fermentado}} = 16425g * \frac{15,3}{100}$$

$$m_{\text{sacarosa en el fermentado}} = 2513,025 \text{ g}$$

Finalmente, la cantidad de CO₂ desprendido del proceso de fermentación alcohólica es:

$$m_{CO_2} = 2513,025g * \frac{88gCO_2}{180gC_6H_{12}O_6}$$

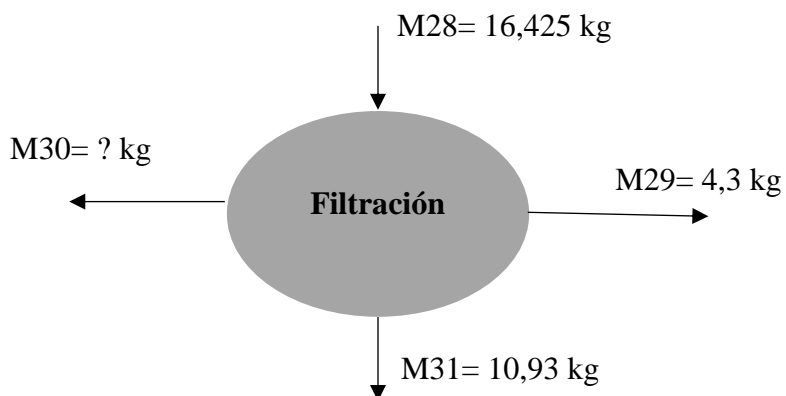
$$m_{CO_2} = 1228,59g$$

$$m_{CO_2} = 1,228 \text{ kg } CO_2$$

4.2.7.3. Balance de materia en la etapa de filtración

En la figura 3-26, se muestra el balance de materia en la etapa de filtración:

Figura 3-26: Balance de materia en la etapa de filtración



Fuente: Elaboración propia, 2023.

La corriente M31 es la cantidad de fermentado total que se obtuvo de todo el proceso de fermentación alcohólica, este tiene una densidad de 1,141 kg/litro (ver ANEXO F).

$M31 = \text{Cantidad de fermentado filtrado (kg)} = 9,580 \text{ litros} * 1,141 \text{ kg/litro} = 10,93 \text{ kg}$.

Balance de materia global en la etapa de filtración del fermentado de cascarilla de arroz:

$$M28 = M29 + M30 + M31 \quad \text{Ecuación (3-20)}$$

Despejando la ecuación (3-20):

$$M30 = M29 + M31 - M28$$

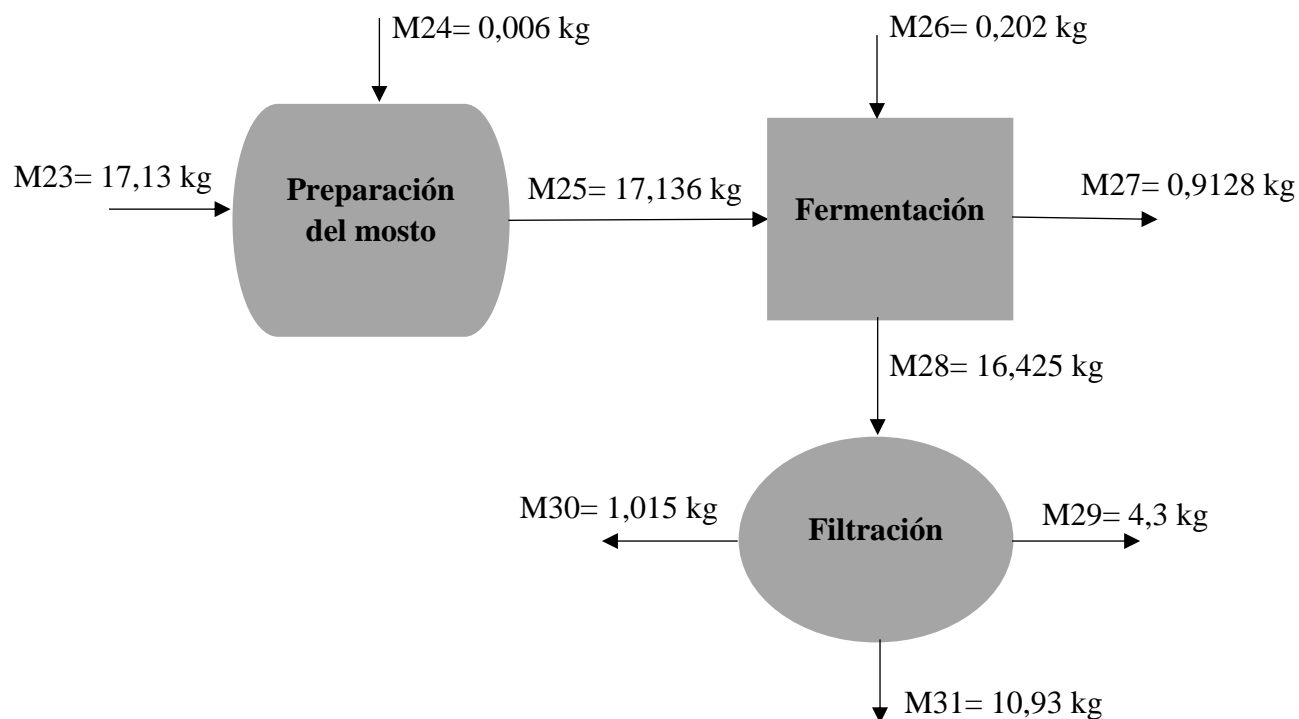
$$M28 = 16,425 \text{ kg} + 4,3 \text{ kg} - 10,93 \text{ kg}$$

$$M28 = 1,015 \text{ kg}$$

4.2.8. Resumen general de balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica

En la figura 3-27 se muestra el resumen general de balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica:

Figura 3-27: Resumen general de balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica

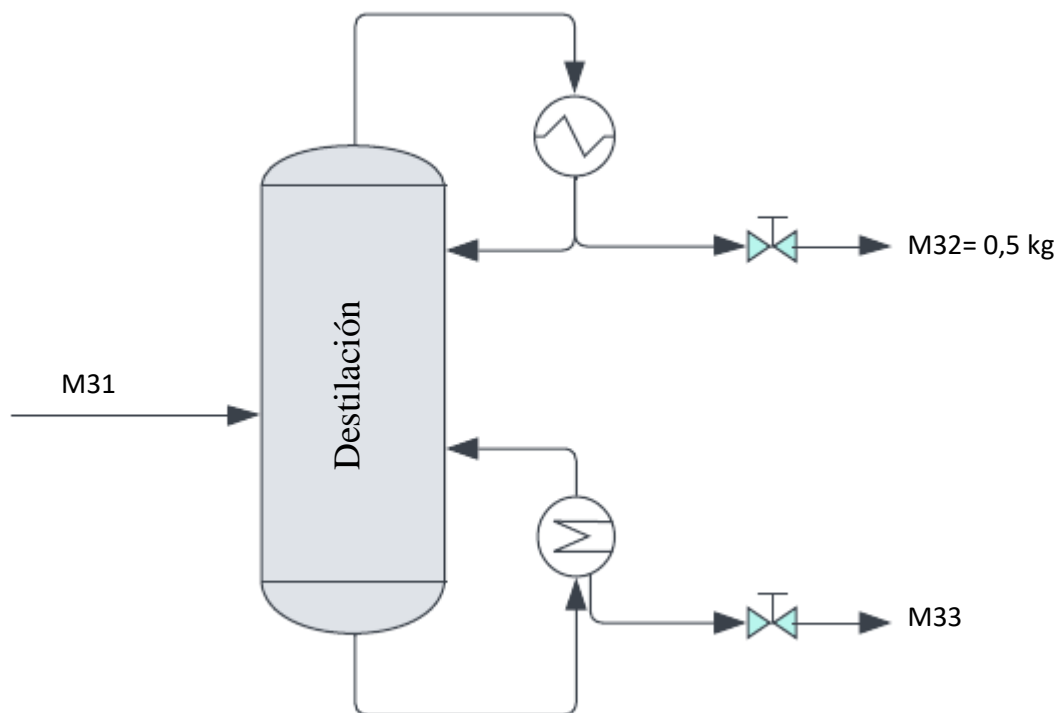


Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.2.9. Balance de materia en la etapa de destilación

En la figura 3-28 se muestra el diagrama de flujo del balance de materia en la etapa de destilación:

Figura 3-28: Diagrama de flujo del balance de materia en la etapa de destilación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Donde:

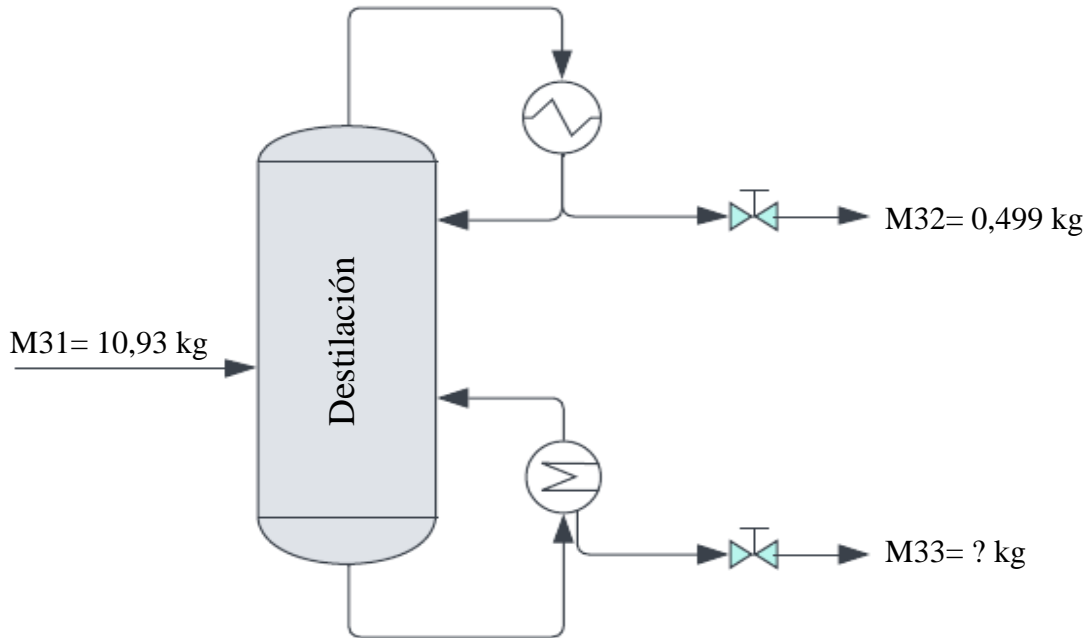
M31= Cantidad de fermentado filtrado (kg).

M32= Cantidad de producto obtenido (kg).

M33= Cantidad de producto de cola (kg).

En la figura 3-29 se muestra el proceso del balance de materia en la etapa de destilación obteniendo una cantidad de producto igual a 0,570 litros con un grado alcohólico igual a 78 °GL.

Figura 3-29: Balance de materia en el proceso de destilación



Fuente: Elaboración propia, 2023.

La corriente M31 es la cantidad de producto total que se obtuvo en el proceso de destilación, este tiene una densidad de 0,8761 kg/litro (ver ANEXO E).

M32= Cantidad de producto obtenido (kg) = 0,570 litros *0,8761 kg/litro= 0,499 kg.

Balance de materia global en la etapa de destilación del fermentado de cascarilla de arroz:

$$M31 = M32 + M33 \quad \text{Ecuación (3-21)}$$

Despejando la ecuación (3-21):

$$M33 = M31 - M32$$

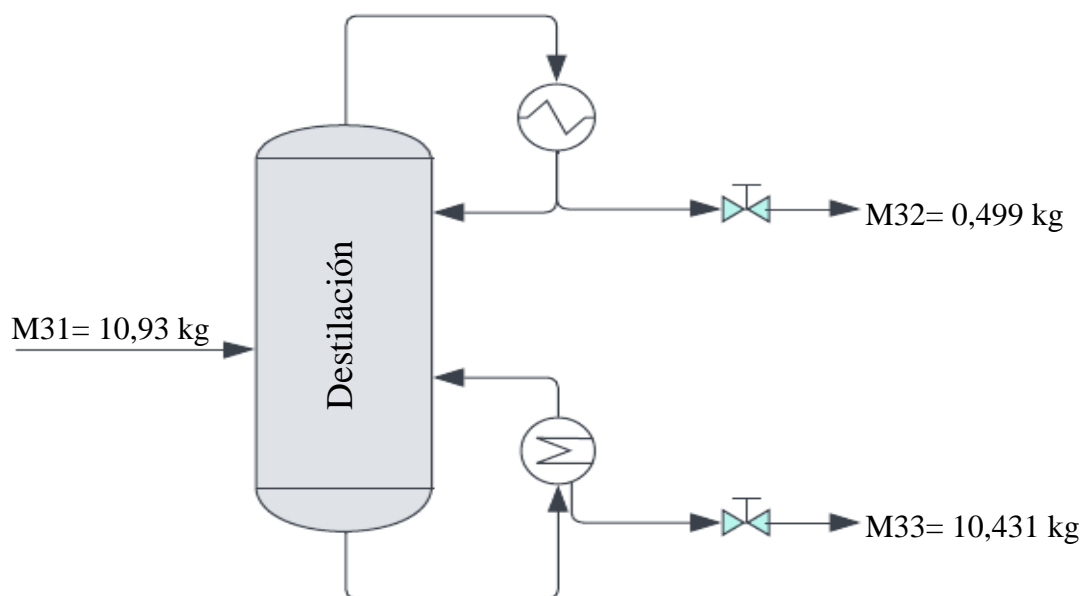
$$M33 = 10,93 \text{ kg} - 0,499 \text{ kg}$$

$$M33 = 10,431 \text{ kg producto de cola}$$

4.2.10. Resumen general de balance de materia en la etapa de destilación

En la figura 3-30 se muestra el resumen general de balance de materia en la etapa de destilación:

Figura 3-30: Resumen general del balance de materia en la etapa de destilación para obtener bioetanol

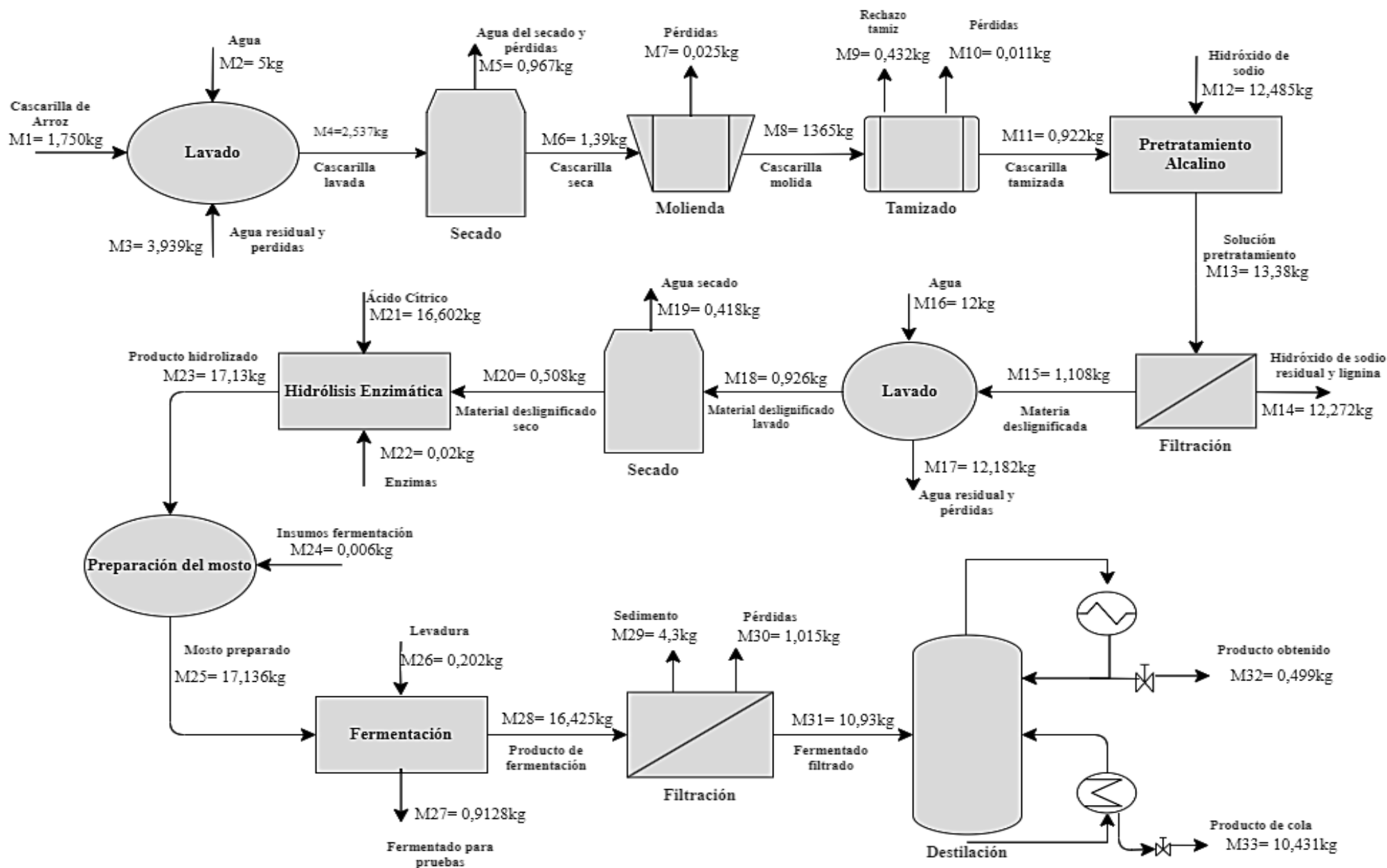


Fuente: Elaboración propia, 2023.

4.3. Resultados del balance de materia en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz

En la figura 3-31 se muestra el resumen general del balance de materia en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz a nivel laboratorio:

Figura 3-31: Resumen general del balance de materia en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz



4.4. Balance de Energía para la obtención de bioetanol de cascarilla de arroz

Para realizar el balance de energía se deben tomar en cuenta los procesos que impliquen un intercambio de energía.

Aplicando la primera ley de la termodinámica “Ley de la conservación de la energía”. Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y sus alrededores, entonces se dice que el sistema es cerrado, descrita mediante la siguiente ecuación. (Smith & Abbott, 1996).

$$\Delta E_{cinética} + \Delta E_{potencial} + \Delta U = Q + W \quad \text{Ecuación (3-22)}$$

Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos donde la energía cinética y potencial son tan pequeños que pueden considerarse a estos como despreciables, sino solamente en su energía interna. (Smith & Abbott, 1996).

$$\Delta E_{cinética} + \Delta E_{potencial} = 0 \quad \text{Ecuación (3-23)}$$

Como el sistema se encuentra en un estacionario el volumen se mantiene constante por lo cual no se efectúa el trabajo en el sistema. (Smith & Abbott, 1996).

$$W = 0$$

Entonces la ecuación es:

$$\Delta U = Q \quad \text{Ecuación (3-24)}$$

$$Q_{cedido} = Q_{ganado}$$

Según (Smith & Abbott, 1996), para un sistema estacionario a volumen constante el calor sensible y latente es igual a:

$$Q_{sensible} = m_T * Cp * \Delta T \quad \text{Ecuación (3-25)}$$

$$Q_{latente} = m_v * \lambda \quad \text{Ecuación (3-26)}$$

$$Q_{Total} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad \text{Ecuación (3-27)}$$

Donde:

m_T = Masa total del componente (kg).

C_p = Capacidad calorífica (Kcal/kg °C)

ΔT = Diferencial de temperatura (°C)

T_f = Temperatura final (°C)

T_i = Temperatura inicial (°C)

m_v = Masa de agua que se evapora (kg)

λ = Calor latente de vaporización (Kcal/kg)

4.4.1. Balance de energía en la etapa de secado de la cascarilla de arroz

4.4.1.1. Calor sensible

Para el cálculo de la energía requerida se emplea la ecuación de calor sensible (3-25):

$$Q_{sensible} = m_T * C_p * \Delta T$$

T_f = Temperatura final = 70 °C

T_i = Temperatura inicial = 20 °C.

m_T = Masa total = 0,926 kg

$C_{p\text{cascarilla de arroz}}$ = 3,28 Kcal/kg °C (Prada & Cortés, 2010).

$$Q_{sensible} = 0,926 \text{ kg} * 3,28 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (70 - 20) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{sensible} = 151,86 \text{ Kcal}$$

4.4.1.2. Calor latente

Para el cálculo del calor latente se emplea la ecuación de calor latente (3-26):

$$Q_{latente} = m_v * \lambda$$

λ = Calor latente de vaporización del agua = 512,740 Kcal/kg (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

m_v = Masa de agua = 0,418 kg

$$Q_{latente} = 0,418kg * 512,740 \frac{Kcal}{kg}$$

$$Q_{latente} = 214,32 Kcal$$

4.4.1.3. Cálculo del calor total

Para el cálculo del calor total se emplea la ecuación (3-27) de calor total:

$$Q_{Total} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{Total} = 151,86 Kcal + 214,32 Kcal$$

$$Q_{Total} = 366,18 Kcal$$

4.4.2. Cálculo de balance de energía en la etapa de destilación

4.4.2.1. Calor sensible

Para el cálculo de la energía requerido se emplea la ecuación de calor sensible (3-25):

$$Q_{sensible} = m_T * Cp * \Delta T$$

$$Q_{sensible} = m_{Ti} * X_i * Cp_i * \Delta T$$

Donde:

Q_s = Calor sensible

Cp_{agua} = Calor específico del agua = 1 Kcal/kg°C (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

Cp_{etanol} = Calor específico del etanol = 0,579 Kcal/kg°C (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

X_{agua} = Composición de agua presente en la mezcla

X_{etanol} = Composición de etanol presente en la mezcla

T_f = Temperatura final = 80°C

T_i = Temperatura inicial = 20°C

*Datos iniciales de composición de agua y etanol en la muestra:

Masa de fermentado (mezcla etanol-agua) total = 10,93 kg

El alcohol obtenido tiene un grado alcohólico de °GL = 78; por bibliografía se conoce que 1°GL es igual a 1 ml de etanol en 100 ml de solución, entonces:

$$\text{masa de etanol en el fermentado} = 78 \frac{g}{100ml} * 570ml = 444,6 g = 0,4446 kg$$

$$\text{masa de agua en el fermentado} = 10,4854 kg$$

Mediante regla de tres simple se puede calcular el porcentaje de etanol presente en la mezcla:

$$10,93kg \text{ mezcla total} \rightarrow 100\%$$

$$0,4446 kg \text{ etanol} \rightarrow X_{\text{etanol}}$$

$$X_{\text{etanol}} = \frac{0,4446kg * 100\%}{10,93}$$

$$X_{\text{etanol}} = 4,07\% = 0.0407$$

$$X_{\text{agua}} = 95,93\% = 0.9593$$

Empleando la ecuación (3-24) se obtiene:

$$Q = (m_{\text{mezcla}} * X_{\text{agua}} * Cp_{\text{agua}} + m_{\text{mezcla}} * X_{\text{etanol}} * Cp_{\text{etanol}}) * \Delta T$$

$$Q_s = (10,93kg * 0,9593 * 1 \frac{Kcal}{kg^{\circ}C} + 10,93kg * 0,0407 * 0,579 \frac{Kcal}{kg^{\circ}C}) * (80 - 20)^{\circ}C$$

$$Q_s = 644,56 Kcal$$

4.4.2.2. Calor latente de vaporización

Para el cálculo del calor latente se emplea la ecuación de calor latente (3-26):

$$Q_{latente} = m_{vi} * \lambda_i$$

λ_{agua} = Calor latente de vaporización del agua = 512,740 Kcal/kg (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

λ_{etanol} = Calor latente de vaporización del etanol = 200,56 Kcal/kg (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

$$Q_l = 10,4854kg * 0,9593 * 512,740 \frac{Kcal}{kg} + 0,4446kg * 0,0407 * 200,56 \frac{Kcal}{kg}$$

$$Q_{latente} = 5161.09 Kcal$$

4.4.2.3. Calor absorbido por el condensador

Para el cálculo de calor que absorbe el condensador se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q_{condensador} = m_{agua} * Cp_{agua} * \Delta T \quad \text{Ecuación (3-25)}$$

$$Q_{condensador} = m_{agua} * Cp_{agua} * (T_{sal} - T_{ent})$$

Donde:

$Q_{condensador}$ = Calor que absorbe el condensador

m_{agua} = masa de agua que atraviesa el condensador 412,36 (kg)

Cp_{agua} = Calor específico del agua = 1 Kcal/kg°C (Smith, Van Ness & Abbott, 1996).

T_{sal} . = Temperatura de salida del agua del condensador = 21°C

T_{ent} . = Temperatura de entrada del agua al condensador = 18°C

$$Q_{condensador} = 412,36kg * 1 \frac{Kcal}{kg^\circ C} * (21 - 18)^\circ C$$

$$Q_{condensador} = 1237 Kcal$$

4.4.2.4. Calor total

El calor total para el balance de energía, resulta de la sumatoria de todos los calores obtenidos durante la destilación:

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{latente} - Q_{condensador}$$

$$Q_{total} = 644,56Kcal + 5161,09Kcal - 1237Kcal$$

$$Q_{total} = 4568,68 Kcal$$

CAPÍTULO IV
COSTOS DEL PROYECTO

COSTOS DEL PROYECTO

5.1.Evaluación de costos

Para determinar el presupuesto de investigación se realiza la evaluación de costos de los gastos que se realizan durante la elaboración de todo el proyecto.

Las siguientes tablas muestran los detalles de los costos:

Tabla IV-1: Detalle de costos de insumos y materia prima utilizados en la parte experimental del proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cascarilla de arroz	13	kg	0,52	25
2	Agua destilada	40	litro	4	160
3	Enzima α -amilasa	36	g	4	144
4	Enzima β -glucosidasa	36	g	7	252
5	Ácido cítrico	500	g	0,1	50
6	Fosfato de amonio	10	g	0,5	10
7	Metabisulfito de potasio	10	g	0,5	10
8	Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	25	g	0,8	20
9	Úrea	10	g	0,5	10
10	Hidróxido de sodio	1	kg	100	100
11	Otros				100
Total					881

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-2: Detalle de costos de materiales adquiridos en la parte experimental del proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Fermentador casero	1	pza.	150	150
2	Termómetro	1	pza.	50	50
3	pH-metro	1	pza.	90	90
4	Papel filtro	10	pliegue	7	70
5	Piseta	1	pza.	54	54
6	Frascos 1,5 L.	4	pza.	10	40
7	Frascos 800 ml	16	pza.	3	48
8	Frascos vidrio 2 L.	3	pza.	20	60
9	Colador	1	pza.	5	5
12	Otros				150
Total					717

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El resto de los materiales necesarios para la realización del estudio, fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla IV-3: Detalle de los costos de análisis fisicoquímicos

N°	Detalle	Cantidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Azúcares Reductores	16	90	1440
2	Humedad	1	40	40
3	Ceniza	1	70	70
4	Materia grasa	1	90	90
5	Proteína total	1	100	100
6	Fibra cruda	1	10	10
7	Hidratos de carbono	1	10	10
8	Valor energético	1	10	10
9	Grado alcohólico	2	40	80
10	Acidez total	2	50	100
11	Densidad relativa	2	40	80
12	Metanol	2	100	200
Total				2230

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-4: Detalle de costos de material de apoyo

N°	Actividad	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Investigación en internet	4	Mes	150	600
2	Impresión	1200	Hoja	0,3	360
3	Anillados	6	Anillado	6	36
4	Empastados	4	Empastado	50	200
5	Transporte diario	100	Pasaje	14	1400
6	Transporte materia prima	1	Pasaje	20	20
Total					2616

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-5: Detalle de costos de energía en los equipos utilizados

N°	Equipo	Potencia (Kw)	Tiempo (h)	Costo total (Bs.)
1	Estufa	2	72	86,4
2	Baño María	1,32	216	171,1
3	Bomba de vacío	0,18	16	1,7
4	Tamizador	0,12	0,3	0,0
5	Autoclave	2	36	43,2
6	Columna de destilación	0,65	5	2,0
Total				304,4

Fuente: Elaboración propia, 2023.

*El costo fijo asociado al servicio de energía eléctrica fue: 0,6 Bs/kWh.

Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio

N°	Descripción	Costo (Bs.)
1	Costos de insumos y materia prima	881
2	Costos de materiales adquiridos para realizar la parte experimental	717
3	Costos de análisis fisicoquímicos	2230
4	Costos de material de apoyo	2616
5	Costos de energía utilizada	304,4
Total		6748

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El costo total de la investigación es de 6748 Bs.

5.2. Costo de producción

A partir de los balances de materia y energía y el gasto energético de los equipos utilizados puede estimarse el costo de producción para la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz.

El costo de producción se realizó para el mejor experimento obtenido en el diseño experimental de la hidrólisis enzimática, el cual tiene un pH de solución igual a 5.0, una temperatura de 50°C y un tiempo de hidrólisis igual a 48 horas, siendo este experimento el que se empleó en la fermentación y la posterior destilación.

Los costos fijos asociados a los servicios básicos fueron; energía eléctrica 0,6 Bs/ kWh y agua 0,7 Bs/m³.

Las tablas IV-7 y IV-8 estiman el costo de producción:

Tabla IV-7: Detalle de costos de materia prima

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Cascarilla de arroz	1,5	kg	0,5	0,75
2	Hidróxido de sodio	11,45	litro	1	11,45
3	Enzima α -amilasa	10	gramo	4	40
4	Enzima β -glucosidasa	10	gramo	7	70
5	Insumos para fermentación	5	gramo	1	5
6	Levadura	10	gramo	0,8	8
Total					135

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla IV-8: Detalle costos de energía de los equipos utilizados

N°	Equipo	Potencia (Kw)	Tiempo (h)	Costo total (Bs.)
1	Baño María	0,96	48	27,6
2	Columna de destilación	0,65	4	1,6
Total				29

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El costo total de producción es la suma de los costos de materia prima y consumo energético de los equipos utilizados.

$$\text{Costo total} = 135 + 29$$

$$\text{Costo total} = 164 \text{ Bs.}$$

Para la producción de 570 ml de bioetanol a 78°GL a partir de cascarilla de arroz se tiene un costo aproximado de 164 Bs.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Después de haber realizado el trabajo de investigación de la producción de bioetanol a partir de cascarilla de arroz a nivel laboratorio, se hace posible concluir lo siguiente:

- Con base a la caracterización de la cascarilla de arroz se obtienen los siguientes resultados fisicoquímicos: Cenizas 14,15%, Fibra 49,12%, Materia grasa 0,5%, Hidratos de carbono 27,44%, Humedad 6,60%, Proteína total 2,19% y un Valor energético 123,02 Kcal/100g.
- La selección del proceso a emplear para la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz se logró a través de matrices de decisión, tanto para la etapa de pretratamiento y para la etapa de hidrólisis, en las cuales se evaluó la eficiencia del proceso, la disponibilidad de materiales y tecnología, los costos y la formación de compuestos inhibidores en el proceso; llegando a la conclusión que los mejores procesos a emplear en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz son un pretratamiento alcalino y una hidrólisis enzimática.
- Como resultado de los experimentos realizados según el diseño factorial en el proceso de hidrólisis enzimática, la combinación más óptima para este proceso fue: pH de solución igual a 5, Temperatura igual a 50°C y tiempo de hidrólisis igual a 48 horas, obteniendo una concentración de sólidos solubles de 15,6 °Brix.
- El bioetanol obtenido a partir de cascarilla de arroz presentó grado alcohólico de 78°GL con una eficiencia de 38,88%. El grado alcohólico se determinó con un alcoholímetro proporcionado por el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la carrera de ingeniería química, para comprobar los resultados

obtenidos se procedió a realizar los análisis fisicoquímicos en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID).

6.2.Recomendaciones

- Realizar ensayos de la hidrólisis enzimática manteniendo la cantidad de enzima y aumentando la cantidad de cascarilla de arroz.
- El proceso de fermentación es una actividad antigua y bastante extensa, por lo que se recomienda una investigación más profunda en lo que concierne a los diversos tipos de fermentación y sus condiciones de operación para así poder llegar a obtener mejores rendimientos de alcohol.
- Realizar un análisis cuantitativo y cualitativo del sedimento de la fermentación para conocer los compuestos que pueden estar inmersos en este residuo, con el propósito de evaluar si es viable su posterior aprovechamiento.
- Brindar información a la sociedad de la importancia del aprovechamiento de los residuos agrícolas, en este caso en la producción de bioetanol, para darles un valor agregado a los mismos.
- Se recomienda experimentar con enzimas celulasas o un coctel de enzimas en el proceso de hidrólisis enzimática y verificar si existe un incremento en la obtención de azúcares.