

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE BIOETANOL POR HIDRÓLISIS
ENZIMÁTICA DEL ALMIDÓN DE PAPA CARDENAL**

Por:

BRAULIO WILFOR HUAYTA MAMANI

**Proyecto de Grado presentado a Consideración de la “UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el Grado
Académico de Licenciatura en Ingeniería Química.**

JUNIO de 2016

TARIJA-BOLIVIA

V^oB^o

Msc. Ing. Ernesto Álvarez Gonsalves
DECANO

Msc. Ing. Silvana Paz Ramírez
VICEDECANA

PROBADO POR:

TRIBUNAL:

Ing. José Ernesto Auad Aguirre

Ing. Juan Carlos Keri Mentasti

Ing. Patricia castillo

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo estas responsabilidad del autor.

A Dios a padres,
familiares, docentes y amigos

En primer lugar a dios por brindarme la Salud, fortaleza y paciencia; a los docentes por la atención desinteresada y predisposición a colaborarme; Ing. Weimar torrejón, Ing. Ignacio Velásquez, Ing. Rene Michel por la atención desinteresada y por la predisposición a colaborarme; a mis tribunales por su consejos; mis padres por su gran apoyo y mis amigos que me motivaron durante el transcurso de la realización del presente trabajo.

El hombre solo debe creer en la superación personal.

INDICE

| | |
|----------------------|-----|
| ADVERTENCIAS | i |
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| PENSAMIENTO | iv |
| RESUMEN..... | v |

CAPITULO I INTRODUCCION

| | |
|---|---|
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 ETANOL COMO FUENTE DE ENERGIA | 1 |
| 1.3 POLITICAS PUBLICAS PARA LA PRODUCCION DE BIOCOMBUSTIBLES | 2 |
| 1.4 NUEVAS FUENTES DE BIOENERGIA | 3 |
| 1.5 PRODUCCION DE PAPA EN BOLIVIA | 3 |
| 1.6 OBJETIVO..... | 4 |
| 1.6.1 OBJETIVOS GENERAL..... | 4 |
| 1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 1.7 JUSTIFICACIÓN | 5 |

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

| | |
|--|----|
| 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA..... | 7 |
| 2.1.1 CLASIFICACIÓN BOTÁNICA..... | 8 |
| 2.1.2. COMPOSICIÓN DE LA PAPA (<i>SOLANUM TUBEROSUM</i>) | 8 |
| 2.1.3. ENERGIA | 10 |
| 2.1.4. CARBOHIDRATOS..... | 10 |
| 2.1.5. PROTEINAS..... | 10 |
| 2.1.6. GRASA | 10 |
| 2.1.7. VITAMINAS | 11 |
| 2.1.8. MINERALES..... | 11 |
| 2.1.9. COMPONENTE NO NUTRITIVOS..... | 11 |
| 2.1.10. FIBRA..... | 11 |
| 2.1.11. ACIDOS ORGANICOS | 11 |

| | |
|---|----|
| 2.2 ALMIDON | 12 |
| 2.2.1. COMPOSICION DEL AMIDON | 12 |
| 2.2.2. AMILOSA | 12 |
| 2.2.3. AMILOPECTINA..... | 13 |
| 2.3. CONTENIDO DE AMILOSA Y AMILOPECTINA EN ALMIDON | 14 |
| 2.4. HIDROLISIS | 14 |
| 2.4.1. HIDROLISIS QUIMICA DEL ALMIDON | 15 |
| 2.4.2. HIDROLISIS ENZIMATICA DE ALMIDON | 16 |
| 2.5. FERMENTACION ALCOHOLICA | 17 |
| 2.5.1. CINÉTICA DE FORMACIÓN DEL ALCOHOL ETÍLICO | 18 |
| 2.5.1.1. GLUCOLISIS | 19 |
| 2.5.1.2. VIAS ANAEROBICAS | 26 |
| 2.5.1.3. FERMENTACION ALCOHOLICA | 26 |
| 2.5.1.4. FERMENTACION LACTICA | 27 |
| 2.6. LEVADURAS EN LA FERMENTACIÓN | 27 |
| 2.6.1.LA LEVADURA SACCHAROMYCES CEREVISIAE | 27 |
| 2.6.2. LA LEVADURA SACCHAROMYCES CARLSBERGENSIS | 28 |
| 2.6.3. LA LEVADURA SACCHAROMYCES PASTORIANUS | 28 |
| 2.6.4. LA LEVADURA WILLIA ANÓMALA | 28 |
| 2.7. TIPOS DE FERMENTACION | 29 |
| 2.7.1. FERMENTACIÓN DISCONTINUA | 29 |
| 2.7.2. FERMENTACIÓN CONTINÚA..... | 30 |
| 2.8. DESTILACION | 30 |
| 2.8.1. DESTILACIÓN SIMPLE | 31 |
| 2.8.1.1 DIFERENCIAL O ABIERTA | 31 |
| 2.8.1.2 CERRADA O DE EQUILIBRIO..... | 31 |
| 2.8.2 DESTILACIÓN POR RECTIFICACIÓN | 32 |

CAPITULO III

PARTE EXPERIMENTAL

| | |
|--|----|
| 3.1. ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA PAPA CARDENAL | 33 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN | 33 |
| 3.3. HIPÓTESIS..... | 34 |
| 3.4. PROCESO DE HIDROLISIS ENZIMATICA DEL ALMIDÓN..... | 34 |
| 3.4.1. BALANCE DE MATERIA GENERAL | 35 |
| 3.5. DESCRIPCION DEL PROCESO DE HIDROLISIS PARA LA OBTENCION DE DEXTRINA Y AZUCARES FERMENTABLES..... | 36 |
| 3.5.1. LAVADO Y PELADO | 36 |
| 3.5.2. CORTADO Y PESADO | 36 |
| 3.5.3. EXTRACCIÓN DEL ALMIDON Y AGUA..... | 37 |
| 3.5.4. LAVADO DEL ALMIDON POR SEDIMENTADO | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.5.5. CUANTIFICACION DE LA CANTIDAD DE ALMIDON EN CADA MUESTRA | 39 |
| 3.5.6. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN | 39 |
| 3.5.7. PROCESO DE HIDROLIZADO | 39 |
| 3.5.8. DISEÑO FACTORIAL PARA LA HIDROLISIS | 40 |
| 3.5.8.1. OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE HIDROLISIS..... | 43 |
| 3.5.9. INACTIVACIÓN DE LA ENZIMA α -AMILASA..... | 43 |
| 3.6. PROCESO DE FERMENTACIÓN | 44 |
| 3.6.1. BALANCE DE MATERIA GENERAL..... | 45 |
| 3.6.2. ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES | 46 |
| 3.6.3. PREPARACIÓN DEL MOSTO | 46 |
| 3.6.4. ESTERILIZACIÓN Y ENFRIAMIENTO | 47 |
| 3.6.5. ACTIVACIÓN LEVADURA SACCHAROMYCES BAYANUS | 47 |
| 3.6.6. FERMENTACION ALCOHOLICA | 48 |
| 3.6.7 FILTRADO | 49 |
| 3.6.8 DESTILACION | 50 |

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|--|----|
| 4.1. CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE ALMIDON EN CADA MUESTRA | 51 |
| 4.2. RESULTADOS DEL PROCESO DE HIDROLISIS | 53 |
| 4.2.1 ANÁLISIS DE AZUCARES TOTALES | 53 |
| 4.2.2 OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE HIDROLISIS..... | 54 |
| 4.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHOLICA | 56 |
| 4.3.1 DATOS OBTENIDOS EN LA PRIMERA FERMENTACIÓN | 56 |
| 4.3.2 DATOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA FERMENTACIÓN..... | 58 |
| 4.4 RESULTADOS DEL PROCESO DESTILACIÓN ALCOHÓLICA..... | 60 |
| 4.4.1 DESTILACION ALCOHÓLICA | 60 |
| 4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO FACTORIAL..... | 61 |
| 4.5.1 VARIABLE RESPUESTA PORCENTAJES DE AZUCARES TOTALES .. | 63 |
| 4.5.2 ANALISIS DE REGRESIO LINEAL MULTIPLE | 66 |

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|--------------------------------|----|
| 5.1 CONCLUSIONES | 68 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 69 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA | 70 |

INDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I-1 Producción mundial bioetanol..... | 2 |
| Tabla I-2 Materia prima para la producción de bioetanol..... | 3 |
| Tabla I-3 Superficie cultivada, producción y rendimiento de la papa. | 4 |
| Tabla II-1 Composición química de la papa | 9 |
| Tabla II-2 Contenido de amilosa y amilopectina en almidon | 15 |
| Tabla III-1 Composición proximal..... | 33 |
| Tabla III-2 Parámetros para la conversión del almidón a dextrina y azúcares fermentables. | 41 |
| Tabla III-3 Diseño factorial para el proceso de la hidrólisis..... | 42 |
| Tabla III-4 Datos del diseño factorial en la hidrólisis..... | 42 |
| Tabla IV-1 Resultados obtenidos en el secado | 52 |
| Tabla IV-2 Secado de la muestra 1 | 53 |
| Tabla IV-3 Resultados de azúcares totales..... | 54 |
| Tabla IV-4 Optimización del tiempo de hidrólisis..... | 54 |
| Tabla IV-5 Datos obtenidos en la primera fermentación..... | 56 |
| Tabla IV-6 Datos obtenidos en la segunda fermentación. | 58 |
| Tabla IV-7 Resultados de la destilación discontinua. | 60 |
| Tabla IV-8 Datos para el análisis de varianza..... | 61 |
| Tabla IV-9 Factores inter-sujetos..... | 62 |
| Tabla IV-10 Análisis de varianza ANOVA (porcentajes de azúcares totales) | 63 |
| Tabla IV-11 Factores inter-sujetos..... | 64 |
| Tabla IV-12 Análisis de Variable ANOVA..... | 65 |
| Tabla IV-13 Variables Introducidas/Eliminadas ^b | 66 |
| Tabla IV-14 Resumen del Modelo ^b | 66 |
| Tabla IV-15 ANOVA ^b | 67 |
| Tabla IV-16 Coeficiente ^a | 67 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 La papa (<i>Solanum tuberosum</i>) | 7 |
| Figura 2-2 Amilosa, polímero de unidades de D – glucosas unidas por enlaces α -1,4. | 14 |
| Figura 2-3 Amilopectina ramificación con enlace α -1,6..... | 14 |
| Figura 2-4 Hidrolisis de amilopectina por acción de alfa y beta amilasa | 17 |
| Figura 2-5 La transformación de la dextrina a glucosa por acción de la glucoamilas.. | 18 |
| Figura: 2-6 Cinética de formación del alcohol..... | 21 |
| Figura 2-7 Reactor Batch | 29 |
| Figura 3-1 Diagrama de bloques del proceso de conversión del almidón a dextrina y azúcares fermentables | 34 |
| Figura 3-2 Balance de materia del proceso de hidrolisis | 35 |
| Figura 3-3 Balanza Analítica. | 36 |
| Figura 3-4 Extractora de jugo. | 37 |
| Figura 3-5 Sedimentación 1 | 38 |
| Figura 3-6 sedimentación 2..... | 38 |
| Figura 3-7 Equipo de enfriamiento | 38 |
| Figura 3-8 Enfriamiento de la solución..... | 38 |
| Figura 3-9 Solución en baño maría | 40 |
| Figura 3-10 Rota vapor. | 41 |
| Figura 3-11 Inactivaciones de las enzimas | 43 |
| Figura 3-12 Muestra para el análisis. | 43 |
| Figura 3-13 Diagrama de bloque del proceso de fermentación alcohólica y destilado..... | 44 |
| Figura 3-14 Balance de materia del proceso fermentación alcohólica | 46 |
| Figura 3-15 Autoclave Raypa | 54 |
| Figura 3-16 <i>Saccharomyces bayanus</i> | 48 |
| Figura 3-17 Reactor de fermentación de 10 litros..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-18 Equipo de filtrado al vacío. | 50 |
| Figura 3-19 Muestra filtrada. | 50 |
| Figura 3-20 Rota vapor | 60 |

NOMINA DE ANEXOS

| | |
|--|--|
| ANEXO 1 Informe de Ensayo de Laboratorio curva de hidrolisis enzimáticas | |
| ANEXO 2 Informe de Ensayo de Laboratorio diseño factorial | |
| ANEXO 3 Procedimiento para la Determinación de Alcohol en el Mosto de Fermentación | |
| ANEXO 4 Procedimiento Para la Determinación de Alcohol en Muestra Destilada | |
| ANEXO 5 Balance de Materia del Proceso de Hidrolisis | |
| ANEXO 6 Balance de Materia del Proceso de Fermentación Alcohólica | |
| ANEXO 7 Ficha Técnica Enzimas | |
| ANEXO 8 Ficha Técnica Levadura | |
| ANEXO 9 Descripción de los equipos | |
| ANEXO 10 Ecuaciones del análisis estadístico | |

RESUMEN

Bolivia cuenta con una amplia variedad de papas (*solanum tuberosum*) de alta productividad que representan posibles alternativas industriales para la producción de azúcares fermentables y a partir de ellos obtener productos de mayor valor agregado como por ejemplo el alcohol biocombustible.

El objetivo del presente trabajo es obtener bioetanol por hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal con el fin de establecer la mejor condición para el proceso de hidrolisis enzimática en función de la concentración de azúcares totales.

Para ello se utilizó una metodología de investigación científica diseño factorial de 2^3 dos niveles y tres variables: masa de enzima α -amilasa (MEA) (2.8 gr y 2 gr), pH de la solución (6,2 y 5,2) y temperatura del proceso de hidrolisis de (80°C y 70°C) se pudo concluir que la combinación óptima del proceso de hidrólisis enzimática fue de una masa de enzima α -amilasa de 2.8 gr (+), pH de la solución de 5,2 (-) y la temperatura del proceso de 80°C (+) alcanzando una concentración de azúcares totales de 11,06 % en un tiempo de 2 horas.

El proceso de hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal se realizó en un rota vapor con agitación constante.

Una vez conocidos los parámetros óptimos se procedió a la optimización del tiempo alcanzando una concentración de azúcares totales de 14 % en un tiempo de 2 horas y 30 minutos.

En el proceso de fermentación alcohólica se logró alcanzar un grado alcohólico de 6,041°GL en un tiempo de fermentación del mosto (azúcares y dextrina) de 24 días a partir del uso de la levadura *Saccharomyces bayanus* PB2870 en las condiciones óptimas; recomendado por el fabricante consecutivamente se realizó el proceso de destilación alcohólica en un rota vapor.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

El etanol es un líquido inflamable, incoloro, de olor característico y es el alcohol de menor toxicidad. Tiene aspecto similar al agua pero bastante más volátil que esta.

El etanol también conocido como alcohol etílico o de grano, se obtiene de cuatro tipos de materia prima; los productos ricos en sacarosa, como la caña de azúcar y la remolacha; fuentes ricas en almidón, como cereales (maíz, trigo, cebada, etc.) y tubérculos (**yuca, papa, biomato, etc.**); materiales ricos en celulosa, madera y los residuos agrícolas; y mediante procesos petroquímicos de hidratación del etileno.

1.2 ETANOL COMO FUENTE DE ENERGÍA

El bioetanol, como combustible de transporte, se utiliza de diferentes formas: por ejemplo, la mezcla con gasolina en bajos porcentajes no requiere de modificaciones en los vehículos (menores del 5-10%).

Los alcoholes aumentan el contenido de oxígeno de la gasolina y con ello su octanaje. Así arden mejor y mejoran las prestaciones del vehículo sin que haya que modificar los motores, al mismo tiempo que se reduce el consumo y las emisiones contaminantes (Ballesteros, M. 2006).

La mezcla al 10 % recibe el nombre de "gasohol". El etanol desempeña un papel de aditivo oxigenado de modo indirecto: En forma de ETBE (etil-terciario-butil-eter), que se fabrica a partir de una mezcla de etanol e isobuteno (Ballesteros, M. 2006).

La mezcla del etanol con la gasolina en porcentajes desde el 10 al 85 %, requiere modificaciones en los vehículos. El E-85 es un combustible que contiene hasta el 85% de etanol y solo un 15 % de gasolina (Ballesteros, M. 2006).

En términos energéticos la producción mundial de biocombustibles equivale a 1 % del uso total de combustibles en el transporte terrestre. Brasil y Estados Unidos producen

conjuntamente 85% de la oferta global. (Ver tabla I-1); en ambos países el etanol representa la mayor parte de la producción de biocombustibles (Castro, A. 2015)

Tabla I-1 Producción mundial bioetanol

| N | PAISES | 2015 ('000 m³) |
|--------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Estados Unidos | 54,500 |
| 2 | Guatemala | 15 |
| 3 | Canadá | 1,800 |
| 4 | China | 2,800 |
| 5 | Argentina | 8,000 |
| 6 | Brasil | 27,000 |
| 7 | Colombia | 450 |
| 8 | Perú | 130 |
| 9 | Paraguay | 200 |
| 10 | Tailandia | 1,800 |
| 11 | Unión Europea | 5,100 |
| 12 | India | 600 |
| 13 | Australia | 220 |
| 14 | Filipinas | 160 |
| 15 | Pakistán | 10 |
| 16 | Korea del Sur | 5 |
| 17 | Japón | 5 |
| 18 | Sudáfrica | 5 |
| Total Mundo | | 9,500 |

Fuente: Bioeconomía - Región Centro, 2015

1.3 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE

Un aspecto fundamental para impulsar la producción y el consumo de biocombustibles son las políticas públicas. Entre otras, políticas de consumo obligatorio de biocombustibles, políticas de ayuda a la actividad productiva y a la investigación, políticas comerciales y a las normas técnicas que se establezca (IICA, 2007).

Los países líderes en la producción de bioetanol cuentan con un marco regulatorio para la producción, uso y manejo del etanol, han establecido porcentajes de mezcla de gasolina y etanol y brindan incentivos para su producción (IICA, 2007).

1.4 NUEVAS FUENTES DE BIOENERGIA

En la Conferencia de Bioenergía de Georgia en 2006, la discusión fue más allá del etanol derivado del maíz, incluyendo el biodiesel y otras formas de etanol. Por ejemplo, Peterson, de la Universidad de Georgia, está trabajando en producir etanol a partir de la remolacha. Otro investigador, Brad Buchanan, un granjero de la región central de Georgia, produjo etanol a partir de los residuos de durazno de Lane Packing Co. Una empresa que cultiva duraznos. Stuckey resaltó la cantidad de desperdicios existentes en la industria del durazno debido a la rapidez con que se maduran.

En la tabla I-2 se compara la producción potencial etanol de varios posibles sustratos

Tabla I-2 Materia prima para la producción de bioetanol.

| Materia prima | Producción potencial de bioetanol (L/T) |
|----------------------|--|
| Caña de azúcar | 81 |
| Remolacha azucarera | 103 |
| Boniato | 125 |
| Papa | 110 |
| Mandioca | 180 |
| Maíz | 410 |
| Aceite de palma | 430 |
| Girasol | 418 |
| Ricino | 393 |
| Algodón | 103 |

Fuente: FAO, 2008.

1.5 PRODUCCIÓN DE PAPA EN BOLIVIA

La producción de papa en Bolivia genera 335 millones de dólares al Producto Interno Bruto (PIB) de Bolivia. El cultivo del tubérculo representa el 10 por ciento del PIB agrícola del país (INE, 2015).

La producción de papa en Bolivia del 2009 a 2014 según el Instituto Nacional de Estadística (INE), ha crecido un 18% (ver tabla I-3).

Tabla I-3 Superficie cultivada, producción y rendimiento de la papa.

| Descripción | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| superficie (ha) | 182,942 | 180,416 | 182,896 | 187,520 | 190,209 |
| producción (T) | 956,953 | 975,418 | 906,413 | 1.030,839 | 1.080,050 |
| rendimiento (T/ha) | 5.231 | 5.406 | 5.284 | 5.897 | 5.678 |

Fuente: Instituto Nacional Estadísticas (INE), 2015

Según los datos del Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE) Bolivia requiere de al menos 490 mil toneladas del tubérculo para el abastecer su mercado interno.

La producción de papa en la campaña 2013-2014 alcanzó 1,080`050.0 toneladas que se cultivan en un superficie de 190.209,0 hectáreas en toda Bolivia obteniendo un rendimiento del 5.678 T/ha (INE, 2014).

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 OBJETIVOS GENERAL

Obtener bioetanol a escala laboratorio, por hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el análisis físico-químico de la variedad de papa cardenal.
- Determinar los parámetros necesarios para el proceso de hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal.
- Realizar una optimización del tiempo del proceso de hidrolisis enzimática
- Realizar el proceso de fermentación alcohólica del producto obtenido del proceso de hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal.
- Efectuar el análisis físico-químico del producto final.

1.7 JUSTIFICACIÓN

En la industria de los biocombustibles es preciso establecer un modelo sostenible a partir del uso de fuentes renovables para proporcionar mayor seguridad al suministro de energía (biogás, biodiesel y etanol).

El bioetanol obtenido a partir del almidón de papa cardenal es una fuente renovable, sostenible y una alternativa económicamente viable debido a su alto rendimiento en la producción de bioetanol. Un estudio realizado por la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el 2008 indica que por cada tonelada métrica de papa se producen 110 litros de bioetanol que es mayor a la producida por la caña de azúcar.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE) en nuestro país la producción de papa se realiza en dos temporadas al año con un promedio de producción de 1.080,050 toneladas en un superficie de 190,209 ha.

Según los datos del Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE) Bolivia requiere de al menos 490 mil toneladas del tubérculo para abastecer su mercado interno.

La demanda anual de papa en Bolivia es de 490 mil toneladas que equivale aproximadamente a un medio de la oferta del producto en el mercado interno alcanzando un excedente de producción en Bolivia de 590,050 toneladas al año que equivalen en caso de ser procesadas, alrededor de 64.905,500 litros de alcohol al año.

A continuación se mencionan las razones más relevantes por las cuales este proyecto debe realizarse:

Aspecto social: Los productores de papa en las regiones tendrán una nueva alternativa para la venta de su producto como materia prima para la elaboración de bioetanol garantizando la compra del mismo; esto conlleva la ampliación de nuevas tierras agrícolas la generación de empleo en las regiones, mejorando la calidad de vida de los agricultores.

Aspecto ambiental: El etanol en la mezcla con gasolina reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO) sin incrementar la de Óxidos Nitrosos (NO_x). La mezcla de 10% de etanol al combustible trae los siguientes beneficios: reducción de un 30% de las emisiones de monóxido de carbono y disminución entre un 6% y un 10% de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera.

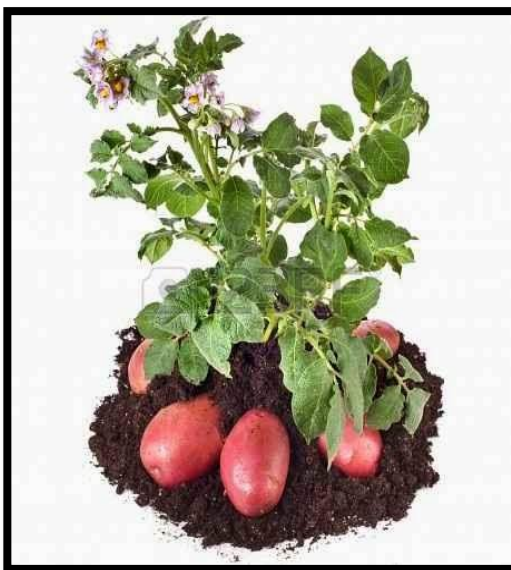
CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta herbácea anual que crece hasta los 100 cm de alto. Durante el crecimiento de la planta de papa, sus hojas compuestas van preparando el almidón que es transferido posteriormente hacia los tallos subterráneos (o estolones). Estos tallos se engrosan para formar tubérculos cerca de la superficie del suelo. Se pueden llegar a formar de unos pocos hasta 20 tubérculos (figura 2-1). El número de tubérculos que llegan a la madurez depende de la disponibilidad de humedad y nutrientes en el suelo.

Figura 2-1 La papa (*Solanum tuberosum*)



Fuente: Paperblog.com (2012).

Posee un importante contenido de almidón, que en promedio puede alcanzar el 18%. Su contenido en proteína y grasa es bajo y presenta una gran variedad de posibilidades para ser industrializada y obtener productos con valor agregado de gran aceptación por parte del consumidor en general.

2.1.1 CLASIFICACIÓN BOTÁNICA

La papa (*Solanum tuberosum*), tiene como nombre común patata y según el Centro Internacional de la Papa con sede en Perú mantiene clasificada de la siguiente manera:

- Reino: Vegetal
- Clase: Angiospermae
- Subclase: Dicotyledoneae
- Orden: Tubiflorae
- Familia: Solanaceae
- Género: Solanum
- Nombre científico: (*Tuberosum solanum*)

2.1.2 COMPOSICIÓN DE LA PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM*)

En la papa se encuentran componentes nutritivos (energía, macro y micronutrientes) y componentes no nutritivos (agua, celulosa, hemicelulosa, pectina, glucoalcaloides, ácidos orgánicos, enzimas, entre otros minoritarios. Luego de su cosecha los tubérculos contienen en promedio 80% de agua y 20% de materia seca (60% de esta corresponde a almidón) (Pertuz, S. 2014).

En la Tabla II-1 se muestra la composición química de la papa que incluye la cascara.

Tabla II-1 Composición química de la papa.

| Nutriente | 100 Gramos de parte comestible (incluye cáscara) |
|---------------------|---|
| Calorías | 84 kcal/g |
| Agua | 76 |
| Proteína | 1,9 |
| Grasa | 0,1 |
| Carbohidratos | 19,3 |
| Azúcares invertidos | 0,11 |
| Fibra | 1 |
| Ceniza | 1 |
| Minerales | mg/100 gramos de parte comestible (incluye cáscara) |
| Calcio | 4 |
| Fosforo | 26 |
| Hierro | 1,1 |
| Ácido ascórbico | 20 |

Fuente: Moreno. B, 1986

La composición se puede modificar por factores tales como la variedad, la localidad donde se produce, el tipo de suelo, el clima y las condiciones de cultivo. Las enfermedades, las plagas, la duración de los ciclos productivos también afectan. De igual manera la composición se modifica con la preparación a nivel casero y con su procesamiento a nivel industrial (Pertuz, S. 2014).

2.1.3 ENERGÍA

Tradicionalmente se ha reconocido que los tubérculos cumplen un rol energético en la alimentación por cuanto su componente mayoritario en materia seca corresponde al almidón. A pesar de ello, comparado con alimentos equivalentes tales como el plátano y la yuca, su aporte calórico es menor y se le considera de baja densidad calórica (Pertuz, S. 2014).

2.1.4 CARBOHIDRATOS

La papa es un alimento que contiene cantidades importantes de carbohidratos los cuales se encuentran mayoritariamente como almidón y un pequeño porcentaje como azúcares (Sacarosa, fructosa, glucosa) (Pertuz, S. 2014).

2.1.5 PROTEÍNA

El contenido de proteína de la papa, aunque inferior al aportado por alimentos de origen animal, es superior al aportado por la mayoría de los cereales, tubérculos y raíces. La calidad de la proteína es inferior por la presencia de glucoalcaloides y de inhibidores de las proteínas. Para mejorar el perfil de aminoácidos de su proteína y por ende la calidad de la proteína consumida, se recomienda el consumo de papa en preparaciones que se combinen o incluyan ingredientes como leguminosos, carnes, leche o derivados (Pertuz, S. 2014).

2.1.6 GRASA

El contenido de grasa de las papas es muy bajo lo cual constituye una ventaja para individuos con restricciones de calorías y/o de grasas dietarias. Dado el incremento en la 3 población de morbilidad por enfermedades crónicas no transmisibles, patologías que requieren limitar el consumo de calorías, se recomienda la moderación en el consumo de papas fritas (Pertuz, S. 2014).

2.1.7 VITAMINAS

Los tubérculos aunque contienen vitaminas, no son considerados alimentos fuente de estos nutrientes. Las vitaminas que se encuentran en el tubérculo son el ácido ascórbico, B1, B6 y niacina. Se concentran principalmente en la piel y en la cáscara. La vitamina C sobresale por su alta reactividad y por las altas pérdidas por oxidación. Tras la cocción o el procesamiento a nivel industrial las pérdidas son significativas (Pertuz, S. 2014).

2.1.8 MINERALES

El contenido de minerales en el tubérculo depende directamente de la naturaleza del suelo donde es cultivado, por tal razón el contenido de minerales es variable. Sobresalen los altos aportes de potasio, fósforo y el bajo contenido de ácido fítico y de sodio. Este último aspecto es una ventaja para personas con regímenes alimentarios que restringen el aporte de sodio en la dieta (Pertuz, S. 2014).

2.1.9 COMPONENTES NO NUTRITIVOS

Incluyen los siguientes componentes:

2.1.10 FIBRA

En la cáscara o piel los tubérculos tienen pectina en forma de pectatos solubles de calcio que favorecen la adhesión a la médula, celulosa, lignina y hemicelulosas. Aunque los tubérculos aportan estos componentes se hace necesario complementar dicha ingesta con el consumo de alimentos tipo leguminosas, frutas y hortalizas (Pertuz, S. 2014).

2.1.11 ÁCIDOS ORGÁNICOS

Los ácidos orgánicos contribuyen con el pH característico del alimento: pH de 5.6-6.2. Los más representativos son el málico, el cítrico y el clorogénico que reacciona con iones de hierro (Pertuz, S. 2014).

Otro compuesto presente en él es la solanina, producida en pequeñas cantidades (menos de 0,2 mg/g de producto), pero que se incrementa hasta 1 mg/g o más en determinadas condiciones (por exposición prolongada a la luz o lesiones mecánicas). Aunque a estas

concentraciones la patata es tóxica, el pelado y el tratamiento térmico (como la cocción o la fritura) permiten destruir esta sustancia; sin embargo, permanece su sabor amargo (Pertuz, S. 2014).

2.2 ALMIDÓN

El almidón “es un hidrato de carbono complejo $(C_6H_{10}O_5)_n$ inodoro e insípido, en forma de grano o polvo. El almidón es el principal carbohidrato de reserva en la mayoría de las plantas” (Brumovsky, L. 2010).

El almidón proviene de diversas fuentes con diferentes estructuras cristalinas. Los granos de cereal como maíz, trigo o arroz son fuentes de almidón, como lo son raíces y tubérculos. Por ejemplo la tapioca y la papa se usan frecuentemente en la preparación de alimentos sin gluten (Brumovsky, L. 2010).

2.2.1 COMPOSICIÓN DEL ALMIDÓN

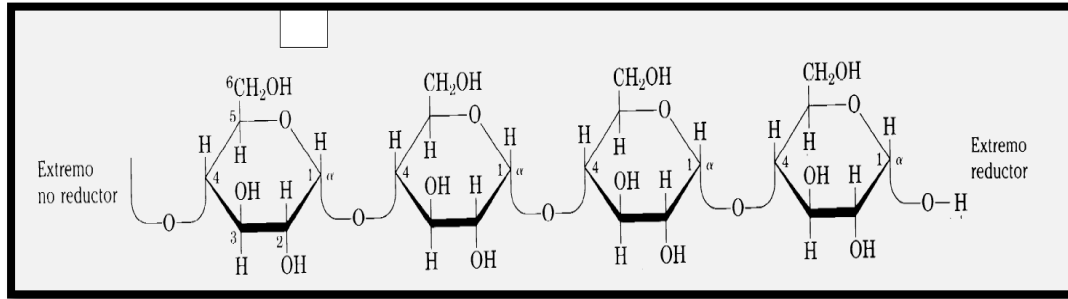
El almidón está constituido por dos moléculas, amilosa y amilopectina, y ambas partes están conectadas por uniones glicosídicas (Brumovsky, L. 2010).

2.2.2 AMILOSOSA

Las moléculas de amilosa supone aproximadamente la cuarta parte del almidón (en algunas variedades como ser los almidones céreos no contienen amilosa). La amilosa es una cadena lineal compuesta por miles de unidades de glucosa con uniones entre carbono 1 y el carbono 4 de las unidades glucosa (ver la figura 2-2) y, por lo tanto, constituida por uniones glicosídicas α -1,4. La amilosa forma una red tridimensional cuando se asocian las moléculas al enfriarse y es responsable de la gelificación de la pasta cocidas frías de almidón (Brumovsky, L. 2010).

Los almidones ricos en amilosa mantienen su forma cuando se moldean; gelifican, mientras que los almidones sin amilosa espesan pero no gelificar (Brumovsky, L. 2010).

Figura 2-2 Amilosa, polímero de unidades de D – glucosas unidas por enlaces α -1.4.

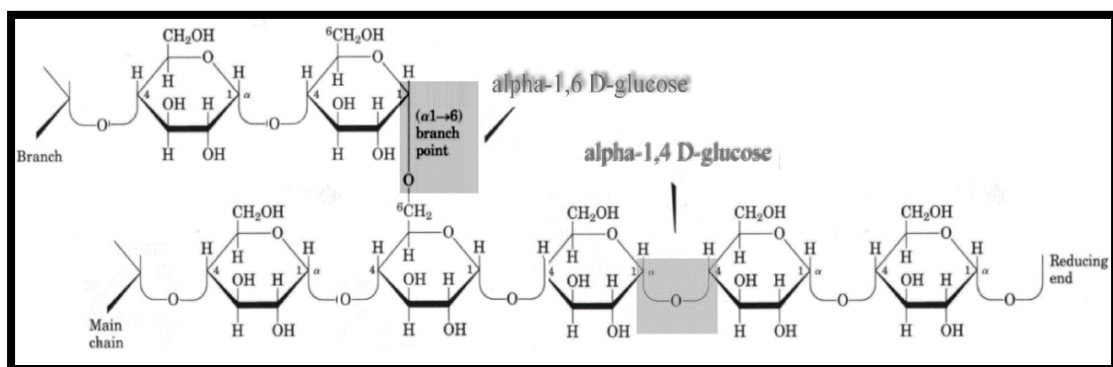


Fuente: Brumovsky, L. 2010.

2.2.3 AMILOPECTINA

Las moléculas de amilopectina suponen aproximadamente tres cuartos de los polímeros en un granulo de almidón. La cadena de glucosa de la amilopectina contiene uniones α -1,4 con ramificaciones α -1,6 cada 15-30 unidades de glucosa de la cadena (ver la figura 2-3). Las uniones son entre el carbono 1 de la glucosa y el carbono 6 de la ramificación. Las cadenas son muy ramificadas (pero menos ramificadas que la forma de carbohidratos de reserva animal, el glucógeno). Los almidones con un alto contenido de amilopectina espesaran una mezcla pero no formaran un gel porque, a diferencia de la amilosa, las moléculas de amilopectina no se asocian y forman enlaces químicos (Brumovsky, L. 2010).

Figura 2-3 Amilopectina ramificación con enlace α -1,6.



Fuente: Brumovsky, L. 2010.

2.3 CONTENIDO DE AMILOSA Y AMILOPECTINA EN ALMIDÓN

Las propiedades tecnológicas del almidón dependen mucho de su origen, y de la relación amilosa/ amilopectina, tanto cuando forma parte de un material complejo (harina). En la tabla II-2 se muestra el contenido de amilosa y amilopectina de distintas fuentes (Brumovsky, L. 2010).

Tabla II-2 Contenido de amilosa y amilopectina en almidón.

| Tipo de almidón | Contenido de amilosa % | Contenido de amilopectina % |
|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| Maíz | 25 | 75 |
| Mandioca | 17 | 83 |
| Papa | 20 | 80 |
| Trigo | 25 | 75 |
| Arroz | 19 | 81 |
| Maíz de alta amilosa | 55-90 | 45-10 |

Fuente: Brumovsky, L. 2010.

2.4 HIDRÓLISIS

Se denomina hidrólisis a las reacciones de la química inorgánica, en donde el agua efectúa una doble descomposición con otro compuesto, (el H⁺ va en un componente y el OH⁻ va en el otro). Este término también puede aplicarse a reacciones en donde un ácido se añade al agua, en mayor o menor cantidad para acelerar la reacción; esta hidrólisis puede llevarse a cabo con ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos o por acción enzimática, la cual es la más utilizada industrialmente.

Con la finalidad de transformar las moléculas del almidón en azúcares fermentables los cuales son asimilados por las levaduras o bacterias el almidón es sometido a un proceso de hidrolisis mediante el cual ocurre un desdoblamiento ya sea por un exceso de agua o por la presencia de una pequeña cantidad de fermento o acido.

2.4.1 HIDROLISIS QUÍMICA DEL ALMIDÓN

El almidón tratado con ácidos se rompe en cadenas cortas de dextrina. El grado de degradación depende de la concentración del ácido, la temperatura, y el tiempo de hidrólisis. A medida que actúa el ácido, el peso molecular y la viscosidad de los productos decrecen y el poder reductor aumenta (Vasquez, M. 2012).

Los ácidos utilizados para la producción de dextrinas son el Ácido clorhídrico y el Ácido Nítrico. Si hervimos el almidón con ácido Clorhídrico 1N durante 1 hora, el almidón se rompe totalmente y se reduce a glucosa; esta reacción es conocida como hidrólisis intensa (Vasquez, M. 2012).

Los productos de degradación son principalmente el hidroximetulfurtutal, el ácido levulinico, y el ácido fórmico, que da al jarabe un sabor amargo. La recombinación de unidades de D-glucosa o de esta con fragmentos como maltosas, conducen a la formación de productos de reversión los cuales pueden ser hidrolizados, un ejemplo de estos productos en la Genciobiosa (Vasquez, M. 2012).

Mediante este procedimiento se logra el desdoblamiento de las moléculas de almidón por la acción de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico diluidos. La clase de ácido, su concentración, la cantidad empleada referida a la cantidad de almidón, así como la presión y la temperatura ejercen gran influencia en la duración de la sacarificación. Por lo general, la cantidad de ácido empleado es tal que el valor de pH se ajuste a 1.5 paz una solución al 33% de almidón (Vasquez, M. 2012).

El agua utilizada, de ser lo más pura posible y libre de hierro, ya que el ácido fosfórico que existe en el almidón forma después de neutralizarse fosfatos de hierro insolubles, finamente dividido, quedando en suspensión en el jarabe y es muy difícil su separación por filtración (Vasquez, M. 2012).

2.4.2 HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE ALMIDÓN

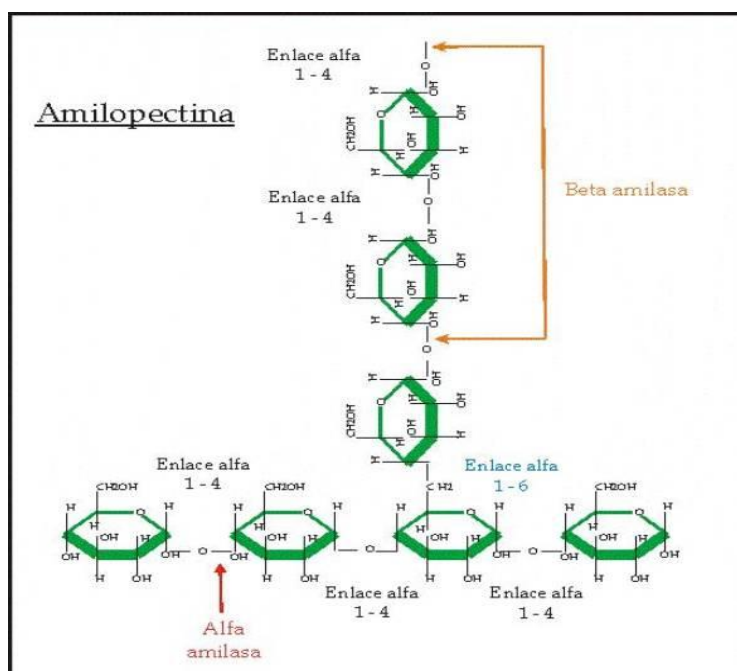
Para obtener etanol a partir del almidón es necesario romper las cadenas de este polisacárido para obtener jarabe de glucosa, el cual se puede convertir en etanol mediante las levaduras.

De cada 100 g de almidón se puede obtener teóricamente 111g de glucosa lo que implica una relación estequiometría de 9:10 (Sánchez, O. 2005).

El etanol se obtiene de mayor medida a partir del almidón de maíz. El almidón fue tradicionalmente hidrolizado mediante ácido, pero la especificidad de las enzimas, sus condiciones suaves de reacción y la ausencia de reacciones secundarias han hecho que las α -amilasa sean las catalizadoras usadas para esta tarea (Sánchez, O. 2005).

Para la hidrólisis del almidón se usa la α -amilasa lo que le hace idea para la primera etapa de la hidrólisis de la suspensión del almidón que tienen que ser llevadas a las temperaturas de (70 - 90) °C para el rompimiento de estos gránulos de almidón provenientes de un tubérculo. (Ver figura 2-4) (Carrera, C. 2004)

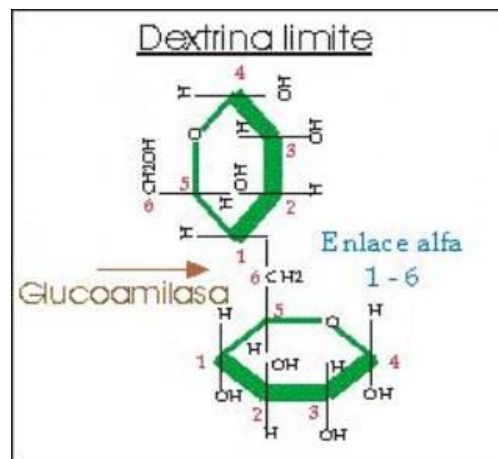
Figura 2-4 Hidrólisis de amilopectina por acción de alfa y beta amilasa



Fuente: cervezadeargentina.com (2010)

El producto de esta etapa o licuefacción es una solución de almidón que contiene dextrinas (oligosacáridos compuesto por varias unidades de glucosa) y pequeñas cantidades de glucosa. El almidón licuado se somete a sacarificación a menor temperatura (60-70) °C con la segunda enzima glucoamilasa la cual hidroliza la dextrina hasta glucosa (ver la figura 2-5) (Sánchez, O. 2005).

Figura 2-5 La transformación de la dextrina a glucosa por acción de la glucoamilasa.



Fuente: cervezadeargentina.com (2010)

2.5 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

La fermentación tiene por objeto modificar la condición química de la materia susceptible de transformación, como los azúcares, por acción de la levadura, convirtiéndola en alcohol etílico y gas carbónico (CO₂). Este proceso va acompañado de una disminución del peso del mosto, conociéndose como atenuación del porcentaje de extracto que se modifica durante el transcurso de la fermentación.

A medida que la fermentación alcohólica transcurre (3°GL) la población de levadura decrece y va siendo sustituida como población dominante por *S. Cereviciae*, particularmente del tipo *Ellipsoideus*; cuando alcanza los (6°GL) la población inicial desaparece. Al final de la fermentación predominan cepas altamente resistentes al alcohol como *S. bayanus* y *S. Cereviciae* como *uvarum* y en ocasiones *Italicus* (Villada, P. 2010).

Las levaduras transforman los azúcares mayoritarios del mosto (fructosa, glucosa) en etanol y CO₂; paralelamente transforman al principio de la fermentación parte de los azúcares en glicerina y ácido pirúvico dando lugar a la denominada fermentación glicero - piruvica: el ácido pirúvico a su vez da lugar a otros productos secundarios que se forman principalmente cuando existe una deficiencia de tiamina en el medio. Además, se produce por rutas alternativas otros ácidos orgánicos entre los que se destacan el ácido málico, succínico y fumarico, que posteriormente puede sufrir transformaciones por reacciones químicas (láctica, succínico y málico generan respectivamente, lactato de etilo, succinato de dietilo y malato de dietilo) o microbiológica por acción de las bacterias malolácticas (Villada, P. 2010).

Para que la fermentación alcohólica se produzca de manera favorable son necesarias varias condiciones, comprendidas en tres formas:

- Condiciones biológicas: levaduras, su selección, desarrollo y acción.
- Condiciones físicas: temperatura, presión y operación mecánica.
- Condiciones químicas: ácidos, oxígeno, sustancias y proceso químicos.

2.5.1 CINÉTICA DE FORMACIÓN DEL ALCOHOL ETÍLICO

El proceso por el cual las células degradan las moléculas de alimento para obtener energía recibe el nombre de respiración celular.

La respiración celular es una reacción exergónica, donde parte de la energía contenida en las moléculas de alimento es utilizada por la célula para sintetizar ATP. Decimos parte de la energía porque no toda es utilizada, sino que una parte se pierde (Márquez, S. 2008).

La respiración ocurre en distintas estructuras celulares. La primera de ellas es la **glucólisis** que ocurre en el citoplasma. La segunda etapa dependerá de la presencia o ausencia de O₂ en el medio, determinando en el primer caso la respiración aeróbica (ocurre en las mitocondrias), y en el segundo caso la respiración anaeróbica o fermentación (ocurre en el citoplasma) (Márquez, S. 2008).

2.5.1.1 GLUCÓLISIS

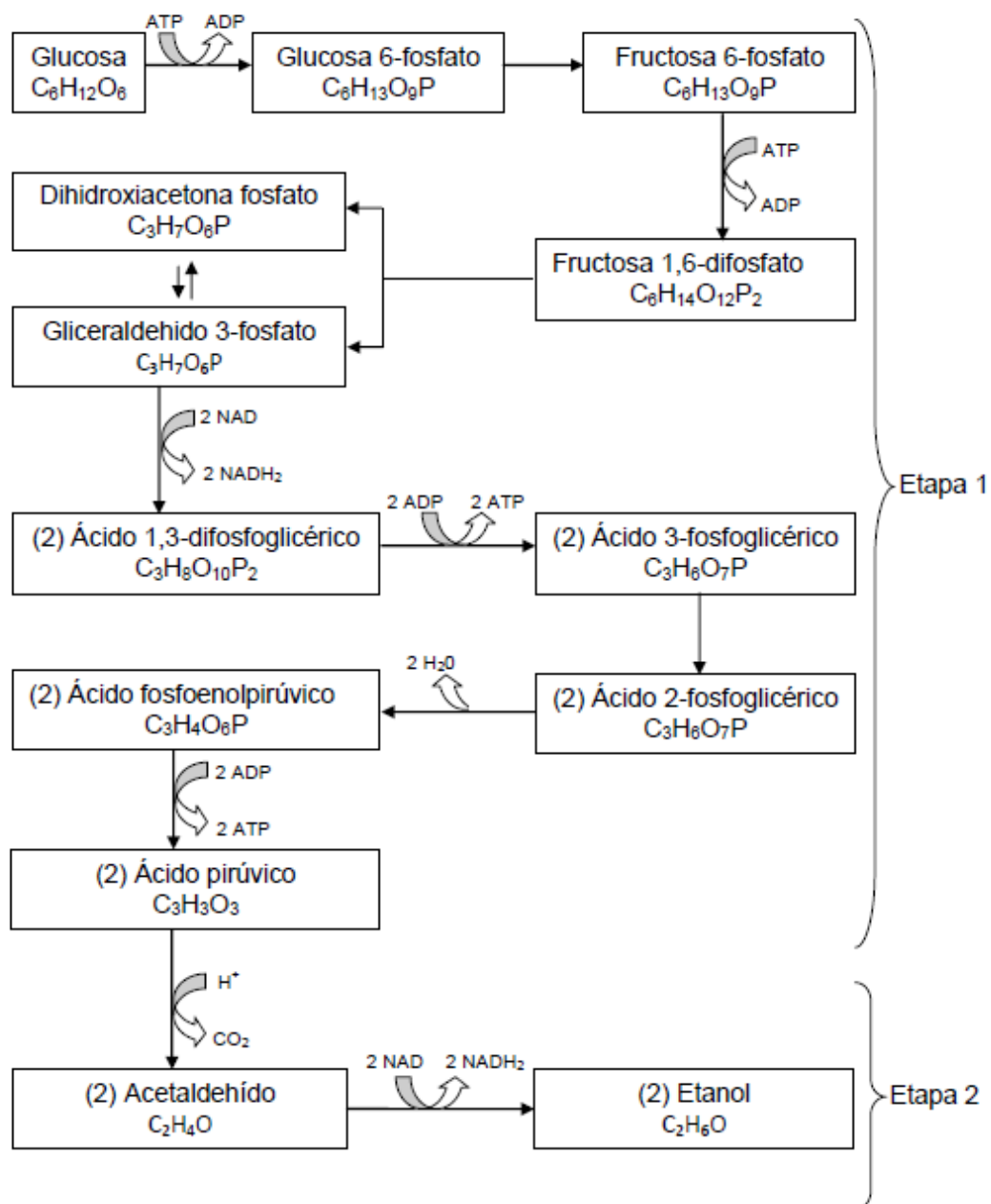
La glucólisis o **escisión de la glucosa**, tiene lugar en una serie de nueve reacciones, cada una catalizada por una enzima específica, hasta formar dos moléculas de ácido pirúvico, con la producción concomitante de ATP. La ganancia neta es de dos moléculas de ATP, y dos de NADH por cada molécula de glucosa (Márquez, S. 2008).

Las reacciones de la glucólisis se realizan en el citoplasma, como ya adelantáramos y pueden darse en condiciones anaerobias; es decir en ausencia de oxígeno.

Los primeros cuatro pasos de la glucólisis sirven para fosforilar (incorporar fosfatos) a la glucosa y convertirla en dos moléculas del compuesto de 3 carbonos gliceraldehído fosfato (PGAL). En estas reacciones se invierten dos moléculas de ATP a fin de activar la molécula de glucosa y prepararla para su ruptura (Márquez, S. 2008).

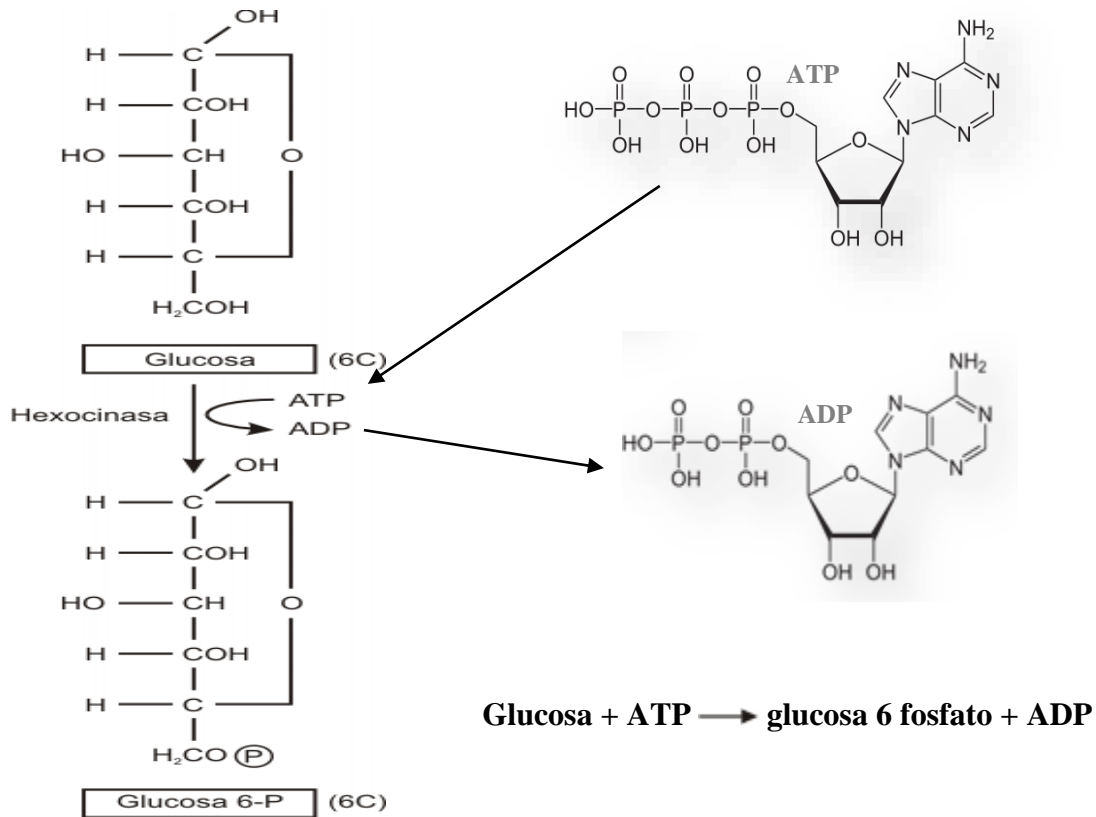
Como ejemplo se muestra la ruta metabólica de formación del alcohol por acción de una levadura (ver figura 2-6)

Figura: 2-6 Ruta metabólica de formación del alcohol



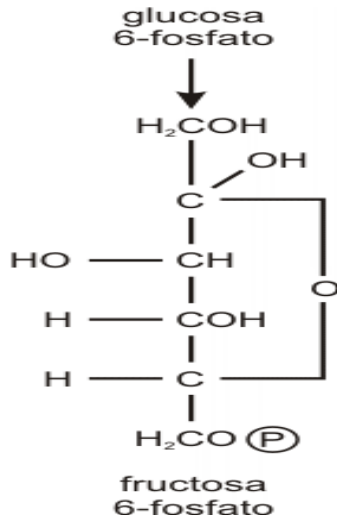
Ruta metabólica de formación de la glucosa a ácido pirúvico requiere nueve pasos que describiremos a continuación

Paso 1 La serie de reacciones glucolíticas se inicia con la activación de la glucosa (Márquez, S. 2008).



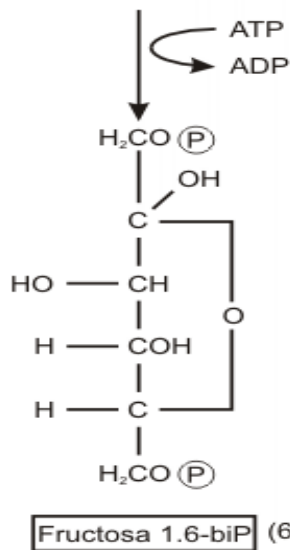
La reacción del ATP con la glucosa para producir glucosa 6-fosfato y ADP es exergónica. Parte de la energía liberada se conserva en el enlace que une al fosfato con la molécula de glucosa que entonces se energiza (Márquez, S. 2008).

ATP o trifosfato de adenosina es un nucleótido fundamental en la obtención de energía celular. Está formado por una base nitrogenada (adenina) unida al carbono 1 de un azúcar de tipo pentosa, la ribosa, que en su carbono 5 tiene enlazados tres grupos fosfato. Es la principal fuente de energía para la mayoría de las funciones celulares.

**Paso 2**

La glucosa 6-fosfato sufre una reacción de reordenamiento catalizada por una isomerasa, con lo que se forma fructosa 6-fosfato (Márquez, S. 2008).

Fructosa 6-P (6C)

Paso 3


La fructosa 6-fosfato acepta un segundo fosfato del ATP, con lo que se genera fructosa 1,6-difosfato; es decir fructosa con fosfatos en las posiciones 1 y 6.

La enzima que regula esta reacción es la fosfofructocinasa (Márquez, S. 2008).

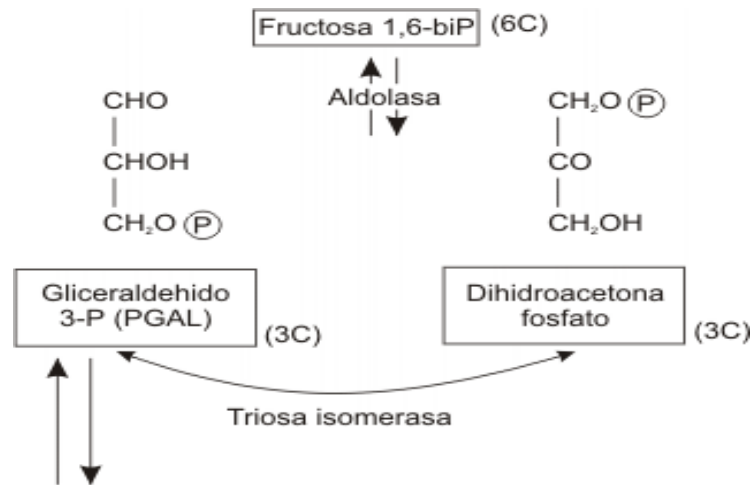
Nota: hasta ahora se han invertido dos moléculas de ATP y no se ha recuperado energía.

La fosfofructocinasa o **fosfofructoquinasa** es la enzima quinasa que fosforila a la fructosa 6-fosfato en la glicólisis.

Esta enzima cataliza la transferencia de un grupo fosfato desde el ATP a la fructosa 6-fosfato para formar un derivado bisfosfato. (Márquez, S. 2008).

Paso 4

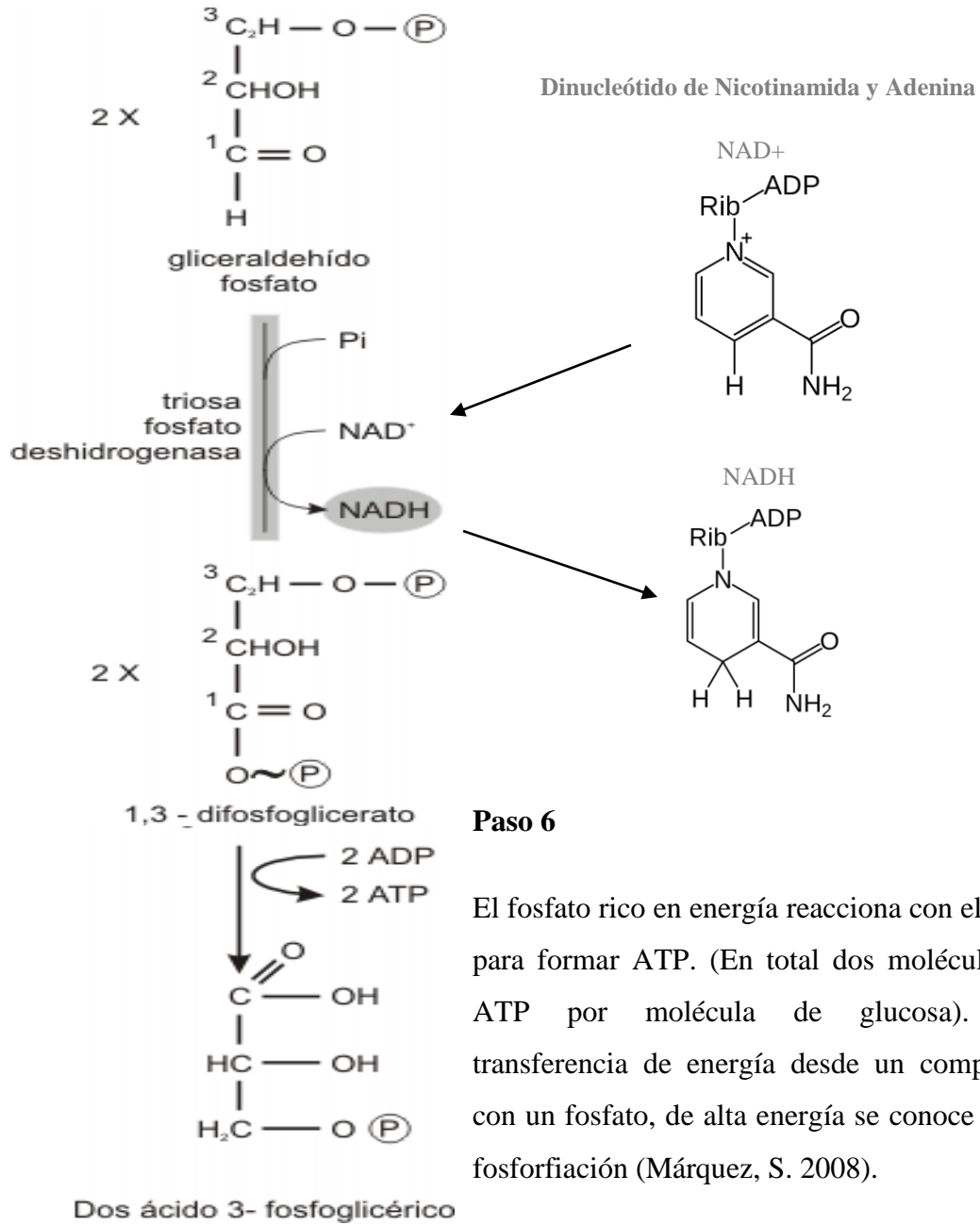
La fructosa 1,6 -difosfato se divide luego en dos azúcares de 3 carbonos, gliceraldehído 3-fosfato y dihidroxiacetona fosfato. La dihidroxiacetona fosfato es convertida enzimáticamente (isomerasa) en gliceraldehído 3 fósforo. Todos los pasos siguientes deben contarse dos veces para tener en cuenta el destino de una molécula de glucosa (Márquez, S. 2008).



Se debe recordar que hasta el momento no se ha obtenido ninguna energía biológicamente útil. En reacciones subsecuentes, la célula recupera parte de la energía contenida en el PGAL.

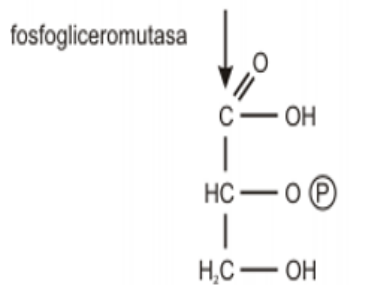
Paso 5

Las moléculas de PGAL se oxidan es decir, se eliminan átomos de hidrógeno con sus electrones, y el NAD^+ se reduce a NADH. Esta es la primera reacción de la cual la célula cosecha energía. El producto de esta reacción es el fosfoglicerato. Este compuesto reacciona con un fosfato inorgánico (P_i) para formar 1,3 difosfoglicerato. El grupo fosfato recién incorporado se encuentra unido por medio de un enlace de alta energía (Márquez, S. 2008).

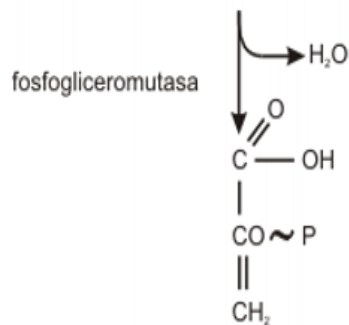


Paso 6

El fosfato rico en energía reacciona con el ADP para formar ATP. (En total dos moléculas de ATP por molécula de glucosa). Esa transferencia de energía desde un compuesto con un fosfato, de alta energía se conoce como fosforiación (Márquez, S. 2008).

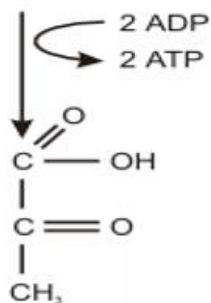


Dos ácido 2 - fosfoglicérico



Dos ácido fosfoenolpirúvico

Dos ácido fosfoenolpirúvico



Dos ácido pirúvico



Hacia la acetilcoenzima A

Pasó 7

El grupo fosfato remanente se transfiere enzimáticamente de la posición 3 a la posición 2 (ácido 2-fosfoglicérico) (Márquez, S. 2008).

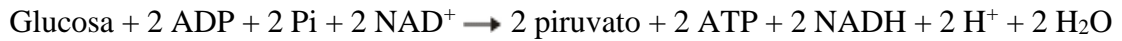
Pasó 8

En este paso se elimina una molécula de agua del compuesto 3 carbonos. Este reordenamiento interno de la molécula concentra energía en la vecindad del grupo fosfato. El producto es el ácido fosfoenolpirúvico (PEP) (Márquez, S. 2008).

Pasó 9

El ácido fosfoenolpirúvico tiene la capacidad de transferir su grupo fosfato a una molécula de ADP para formar ATP y ácido pirúvico. (Dos moléculas de ATP y ácido pirúvico por cada molécula de glucosa) (Márquez, S. 2008).

Ecuación de la glucólisis



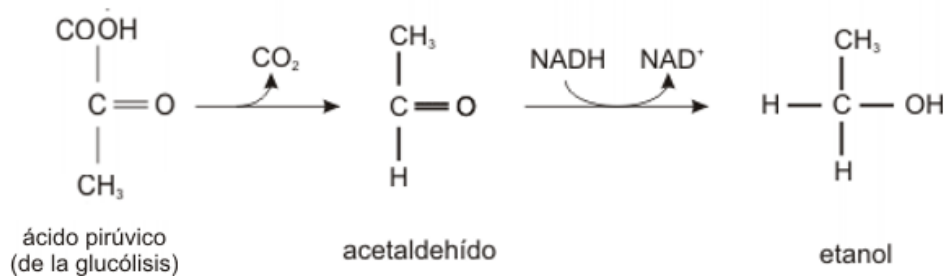
2.5.1.2 VÍAS ANAERÓBICAS

El ácido pirúvico puede ingresar o ser consumida por varias vías. Las dos son anaeróbicas (sin oxígeno) y se denomina fermentación alcohólica y fermentación láctica. A la falta de oxígeno, el ácido pirúvico puede convertirse en etanol (alcohol etílico) (ver figura 2-7) o ácido láctico (ver figura 2-8) según el tipo de célula.

2.5.1.3 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

El ácido pirúvico formado en la glucólisis se convierte anaeróticamente en etanol. En el primer caso se libera dióxido de carbono, y en el segundo se oxida el NADH y se reduce a acetaldehído (Márquez, S. 2008).

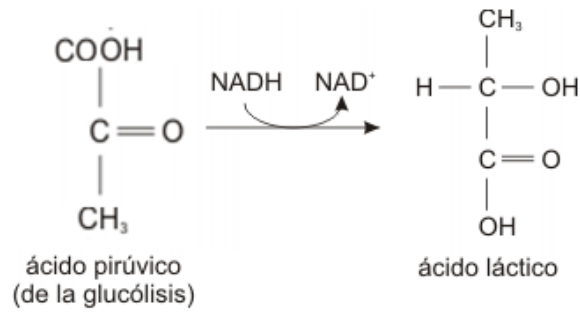
Figura 2-7 formación del etanol a partir del ácido pirúvico



2.5.1.4 FERMENTACIÓN LÁCTICA

En esta reacción el NADH se oxida y el ácido pirúvico se reduce transformándose en ácido láctico.

Figura 2-8 Formación del ácido láctico a partir del ácido pirúvico



El rendimiento estequiométrico teórico para la transformación de glucosa en etanol es de 0.511 g de etanol y 0.489 g de dióxido de carbono por 1 gramo de glucosa. Este valor fue cuantificado por Gay Lussac.

En realidad es difícil obtener este rendimiento porque, como se mencionó anteriormente, la levadura utiliza glucosa para la producción de otros metabolitos indispensables para su crecimiento y desarrollo. El rendimiento experimental varía entre el 90 y el 95 % del teórico, es decir, de 0.469 a 0.485 g/g (Vázquez. H. 2007).

2.6 LEVADURAS EN LA FERMENTACIÓN

Se denomina levadura a cualquiera de los diversos hongos microscópicos unicelulares que son importantes por su capacidad para realizar la fermentación de hidratos de carbono, produciendo distintas sustancias.

2.6.1 LA LEVADURA SACCHAROMYCES CEREVISIAE

Es la especie de mayor uso en la industria vinícola. Se describe normalmente como un anaerobio facultativo, de modo que crece tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas, es capaz de emplear un amplio rango de sustratos entre mono-, di-, y

oligo-sacáridos, así como etanol, acetato, glicerol y hasta lactatos; siendo la glucosa su fuente de carbón preferida, la cual metaboliza a etanol (ver figura 2-9). Se trata generalmente de levaduras apiculadas, es decir con forma de limón, que tienen un bajo poder fermentativo (hasta 4-5 % Vol.) (Dickinson, J. 2003).

Figura 2-9 *Saccharomyces cerevisiae*



Fuente: Dourbano (2015)

2.6.2 LA LEVADURA SACCHAROMYCES CARLSBERGENSIS

Se desarrolla en el mosto de fermentación de la cerveza. Fermenta glucosa, maltosa y sacarosa (Dickinson, J. 2003).

2.6.3 LA LEVADURA SACCHAROMYCES PASTORIANUS

Una vez que se han superado los 4-5 % Vol. de alcohol, otras especies de levaduras dominan el proceso como es el caso de *Saccharomyces pastorianus* y otras.

Hay 3 variedades, una de ellas produce vinos secos de sabor áspero. Las otras actúan sobre la cerveza produciendo líquidos turbios y de sabor amargo (Dickinson, J. 2003).

2.6.4 LA LEVADURA WILLIA ANÓMALA

Se aisló en una levadura de cerveza. Forma velo gris en la superficie de los líquidos y produce olor a esencias y frutas. Fermenta la glucosa pero no descompone la maltosa y sacarosa (Dickinson, J. 2003).

Dado que la mayoría de las levaduras sólo actúan sobre la glucosa mientras que, muy pocas lo hacen sobre la maltosa y la dextrina, en la obtención de alcohol a escala industrial hay que recurrir a hongos ricos en amilasas (proteínas) que hidrolizan el

almidón y la dextrina. Algunos de estos hongos prosiguen la transformación descomponiendo los azúcares obtenidos en alcohol, como el *Aspergillus oryzae* que produce el sake (alcohol de arroz) (Dickinson, J. 2003).

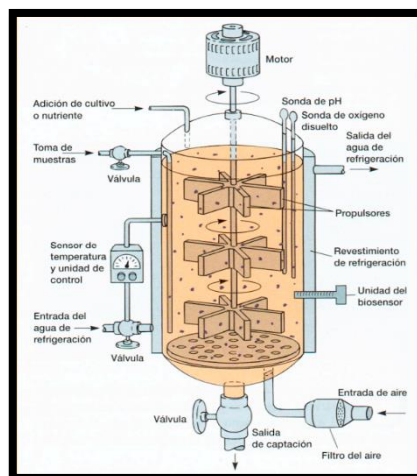
2.7 TIPOS DE FERMENTACION

El mantenimiento de un ambiente aséptico y de condiciones aeróbicas son, probablemente, los dos puntos de mayor relevancia que hay que considerar. Los fermentadores más ampliamente utilizados a nivel industrial están provistos de mecanismos de agitación, dispersión y aireación así como de sistemas para el control de la temperatura, pH y formación de espuma.

2.7.1 FERMENTACIÓN DISCONTINUA

Una fermentación discontinua o batch puede ser considerada como un sistema cerrado (ver figura 2-9). Al inicio de la operación se añade la solución esterilizada de nutrientes y se inocula con el microorganismo, permitiendo que se lleve a cabo la incubación en condiciones óptimas de fermentación. A lo largo de toda la fermentación no se añade más nutrientes. En algunas ocasiones se añade un agente antiespumante y ácidos o bases para controlar el pH de la fermentación. (Mateos, P. 2010).

Figura 2-10 Reactor Batch



Fuente: Darwin, 2010.

2.7.2 FERMENTACIÓN CONTINÚA

En la fermentación continua se establece un sistema abierto. La solución nutritiva estéril se añade continuamente al reactor y una cantidad equivalente del cultivo, con los microorganismos, se saca simultáneamente del sistema (Mateos, P. 2010).

De este tipo tenemos los siguientes:

- Tanque Agitado.
- Columnas empacadas con enzima inmovilizada.
- Torres de lecho fluidizado donde el flujo del medio mantiene suspendidos los microorganismos.

Además tomando en cuenta el estado físico de la mezcla reaccionante, los fermentadores se pueden dividir en:

- Homogéneos.-En los cuales las reacciones ocurren en una solo fase.
- Heterogéneos.- Donde se presentan en dos o más fases.

2.8 DESTILACIÓN

La destilación es una operación unitaria que consiste en la separación de los componentes de una mezcla líquida (en la que todos los compuestos son más o menos volátiles) por evaporación y condensación sucesivas. La separación se basa en la diferencia de volatilidades absolutas de los componentes, lo que tiene como consecuencia la formación de un vapor de composición diferente a la del líquido del que procede (Ocon, J. 2005).

Lógicamente, cuanto mayor sea la diferencia de volatilidades mayor será la separación que se puede conseguir (Ocon, J. 2005).

Los distintos métodos empleados en la destilación se pueden clasificar en los siguientes:

2.8.1 DESTILACIÓN SIMPLE

Consiste en la evaporización parcial de una mezcla con producto de vapor más rico en componentes más volátiles que la mezcla líquida inicial quedando un residuo líquido más rico en componente menos volátiles; se puede llevar a cabo de dos maneras (Ocon, J. 2005).

2.8.1.1 DIFERENCIAL O ABIERTA

Este método de destilación es el que se efectúa normalmente en los laboratorios cuando se trabaja sin reflujo. llenando continuamente los vapores producidos hasta un condensador. La operación se realiza calentando la mezcla líquida inicial hasta su temperatura de ebullición y retirando continuamente los vapores producidos. A medida que transcurre la operación el líquido se empobrece en componente más volátil elevándose continuamente la temperatura de ebullición de la mezcla; del mismo modo los vapores producidos son cada vez más pobre en componente más volátil y su temperatura de condensación aumenta continuamente (Ocon, J. 2005).

2.8.1.2 CERRADA O DE EQUILIBRIO

En este caso el líquido se lleva a una temperatura intermedia entre la de principio y fin de ebullición, dejando que la fase vapor formada alcance el equilibrio con la fase líquida a aquella temperatura. Por aplicación de un balance de materia aplicado a todo el sistema y al componente más volátil, llegamos a la expresión (Ocon, J. 2005).

$$L/V = (y - x_o) / (x_o - x)$$

que nos da la relación entre las cantidades de líquido residual L y la cantidad de vapor V, en función de la composición inicial del líquido x_o , y la composición del líquido y vapor en equilibrio a la temperatura y presión dada, x y y .

Sobre el diagrama de ebullición, construido a la presión de la operación, se leen directamente las composiciones del líquido y de vapor en equilibrio, en función de la composición del líquido inicial y de la temperatura de trabajo (Ocon, J. 2005).

También podemos mencionar otros métodos de destilación simple que son:

- Condensación parcial.
- Condensación diferencial o abierta.

2.8.2 DESTILACIÓN POR RECTIFICACIÓN

La operación por rectificación consiste en hacer circular en contracorriente el vapor de una mezcla con el condensado procedente del mismo vapor, en un aparato denominado columna de rectificación (Ocon, J. 2005).

Las partes esenciales de una columna de rectificación son; la columna propiamente dicha, que es donde se verifica el contacto íntimo entre el líquido y el vapor; calderín, situado en la base de la columna en donde se hace hervir la mezcla a separar; y el condensador de reflujo situado en la cúspide de la columna, que se encarga de suministrar el líquido descendiente para su contacto con el vapor (Ocon, J. 2005).

Para lograr el íntimo contacto entre las fases líquidas y vapor al objeto de establecer el intercambio de materia entre ambas fases interesa que la superficie y el tiempo de contacto sean suficientes; en la práctica este contacto se logra con dos dispositivos diferentes: el de los platos de borboteo que retiene el líquido a treves del cual se va a obligar a pasar el vapor, y el de los cuerpos de relleno, que llenan el interior de la columna verificándose el contacto entre las fase sobre la superficie de estos cuerpos de relleno (Ocon, J. 2005).

Podemos mencionar los siguientes procesos de destilación por rectificación:

- Rectificación continúa.
- Rectificación descontinua.
- Destilación con arrastre de vapor.

CAPITULO III

PARTE EXPERIMENTAL

El presente trabajo de investigación aplicada ha sido desarrollado en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), dependiente del Departamento de Procesos Industriales Biotecnológicos y Ambientales (DPIBA) de la Facultad de Ciencias y Tecnología.

3.1 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA PAPA CARDENAL

La papa empleada para la obtención de bioetanol es la variedad cardenal de alta productividad en el departamento de Tarija, adquirida del mercado local donde se determinó humedad, proteínas totales, almidón y azúcares totales (ver tabla III-1). Se muestra los resultados del análisis proximal de la materia prima realizada en el CEANID, el 2012 por María C. Jigena para el proyecto de grado Obtención de Almidón de Papa Cardenal.

Tabla III-1 Composición proximal

| COMPONENTE | COMPOSICIÓN % |
|------------------|------------------|
| Almidón | 17,49 |
| Humedad | 77,48 |
| Proteínas total | 2,12 |
| Azúcares totales | 0,50 |

Fuente: CEANID, 2012.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El proceso de obtención de bioetanol a nivel laboratorio, por hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal contemplara los siguientes procesos: proceso de hidrólisis enzimática del almidón de papa, proceso de fermentación y destilación alcohólica.

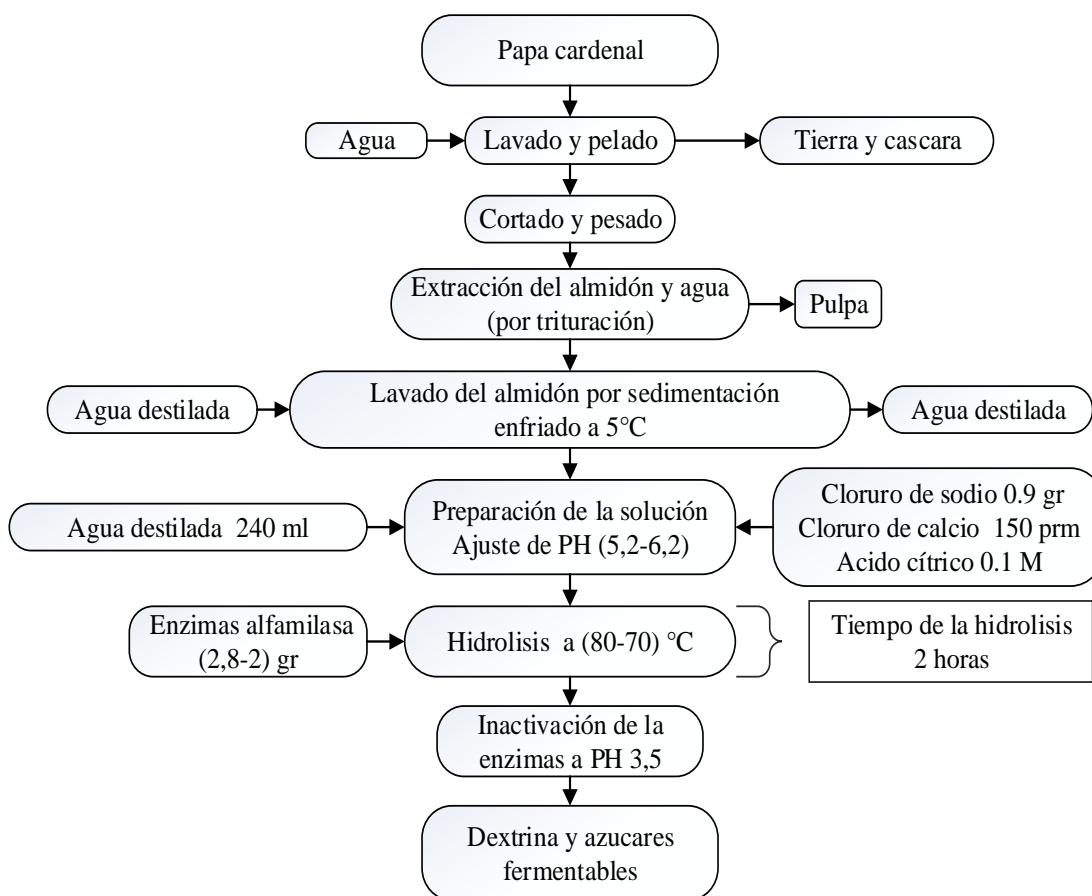
3.3 HIPÓTESIS

Es posible obtener bioetanol por hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal mediante el uso de la enzimas α -amilasa.

3.4 PROCESO DE HIDROLISIS ENZIMÁTICA DEL ALMIDÓN

En la figura 3-1 se muestra el proceso de conversión del almidón a dextrina y azúcares fermentables. El proceso se realizó bajo acción de enzimas dextrinizantes α -amilasa en cantidades de 8 gr/ litro recomendó por el fabricante. (VER ANEXO 7).

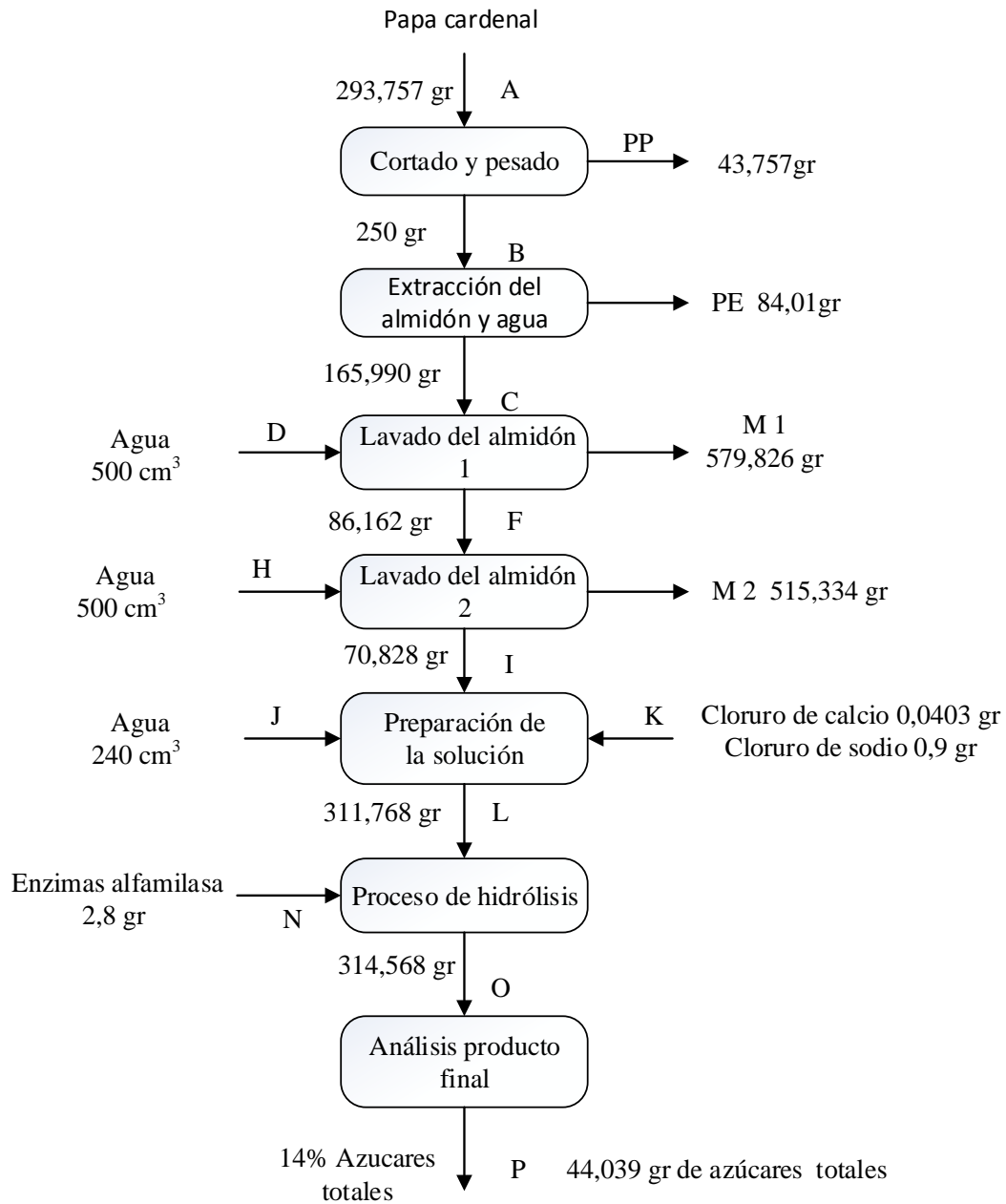
Figura 3-1 Diagrama de bloques del proceso de conversión del almidón a dextrina y azúcares fermentables.



Fuente: Elaboración propia, 2014

3.4.1 BALANCE DE MATERIA GENERAL

En la figura 3-2 se muestra el balance de materia del proceso (VER ANEXO 5)



Fuente: Elaboración propia

Balance global: $A+D+H+J+N+K = PP+PE+M1+M2+P$

3.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE HIDRÓLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE DEXTRINA Y AZÚCARES FERMENTABLES

3.5.1 LAVADO Y PELADO

Una vez seleccionada la papa se procedió con el pelado, con una peladora manual que permite quitar finas capas de la cascara de la papa y así evitar una gran pérdida de materia prima.

3.5.2 CORTADO Y PESADO

Al concluir la etapa de lavado y pelado se procedió al cortado en pequeños trozos. Se procedió a pesar 250g de papa pelada que equivalen a 31,014 gramos de almidón en una balanza analítica Gibertini (ver figura 3-3).

Figura 3-3 Balanza Analítica



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 EXTRACCIÓN DEL ALMIDON Y AGUA

El jugo de cada muestra de papa Cardenal se obtiene con una extractora de jugo Philips (ver figura 3-4) uso doméstico que permite extraer la mayor cantidad de jugo y tener una menor pérdida de esta . Una vez extraído el jugo este se mezcló con agua para ser lavado.

Figura 3-4 Extractora de jugo



Fuente: Elaboración propia

3.5.4 LAVADO DEL ALMIDON POR SEDIMENTADO

Se procedió a lavar el almidón con agua a 10 °C debido a que el almidón en agua fría es insoluble y facilita la sedimentación. Dejando reposar por 30 minutos luego de lo cual se eliminó toda el agua superficial (ver figura 3-5 y 3-6). Se debe repetir el proceso unas dos veces para eliminar la fibra y otras impurezas.

Figura 3-5 Sedimentación 1



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6 Sedimentación 2



Fuente elaboración propia

En las figura 3-7 se muestra un equipo de enfriamiento J.P. Selecta el cual es un equipo que tiene una espiral que enfría la solución hasta 5 °C.

Figura 3-7 Equipo de enfriamiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8 Enfriamiento de la solución



Fuente: Elaboración propia

3.5.5 CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE ALMIDON EN CADA MUESTRA

Para cuantificar la cantidad de almidón que se encuentra en 250g de papa cardenal se procedió al secado en una estufa de 5 muestras, a 55 °C de temperatura y un tiempo determinado hasta obtener un peso constante de las muestras.

3.5.6 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Una vez limpio el almidón se procedió a diluirlo con agua destilada en un porcentaje peso volumen de 1:10 1 gr de almidón por 9 ml de agua destilada. Se procedió a añadir el cloruro de calcio (CaCl_2) en una cantidad de 150 rpm, cloruro de sodio (NaCl) de 0.9 gr y se ajustó el pH con ácido cítrico al valor estimado en el diseño factorial.

La α -amilasa purificada pierde actividad rápidamente por enzimas a los 50 °C pero esta inactivación puede ser retardada por la presencia de calcio y sodio para ser completamente resistente a los extremos de temperatura y pH. Además la α -amilasa requiere de estos metales para la actividad catalítica (Vargas A, 2000).

3.5.7 PROCESO DE HIDROLIZADO.

Una vez ajustado el PH se adiciono la enzima dextrinizante α -amilasa se calentó la solución en baño maría (ver figura 3-9) a temperatura al valor estimado en el diseño factorial con agitación constante 300 rpm el proceso se lo realizo en un rota vapor Heidolph (ver figura 3-10) dejándola actuar por un periodo de 2 horas.

Figura 3-10 Rota vapor



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9 Solución en baño maría



Fuente: Elaboración propia

3.5.8 DISEÑO FACTORIAL PARA LA HIDROLISIS

Para poder determinar las variables significativas en el presente trabajo experimental se plantea un diseño factorial de dos niveles y tres variables o parámetros con dos repeticiones.

Las variables que más influyen en el proceso de hidrólisis del almidón son el tipo de catalizadores (masa de enzimas), la temperatura de proceso y el pH.

Según Jorge Carrera C. el intervalo de temperatura del proceso de hidrólisis del almidón es de 70°C - 90°C para el rompimiento de los gránulos de almidón proveniente de un tubérculo y un pH del proceso de 6.

Por especificaciones del fabricante la cantidad del catalizador o masa de enzima α -amilasa es de 8 gr/l, temperatura del proceso de 50°C -80°C y un pH de 5,7

En base al marco teórico realizado para el presente trabajo se fijó dos temperaturas del proceso de hidrólisis de 70°C y 80°C, masa de enzima α -amilasa de (2 gr y 2,8 gr) y un pH del proceso de hidrólisis (5,2 y 6,2) que se encuentra dentro del intervalo que se estableció por Jorge Carrera y el fabricante (ver tabla III-2).

El tiempo de hidrólisis se mantuvo constante durante un tiempo de 2 horas que luego de conocer las condiciones óptimas del proceso de hidrólisis se procedió a una optimización del tiempo.

Tabla III-2 Parámetros para la conversión del almidón a dextrina y azúcares fermentables.

| Nivel | masa de enzima α-amilasa (MEA) en (gr) | pH de hidrólisis en (pH) | Temperatura de hidrólisis (T) en (C⁰) |
|--------------|---|---------------------------------|---|
| superior | 2.8 | 6.2 | 80 |
| inferior | 2 | 5.2 | 70 |

Fuente: Elaboración propia.

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial de 2^3 (dos niveles, tres variables).

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

$$\text{Niveles} = 2$$

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

Como se harán dos repeticiones entonces.

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

Considerando las combinaciones de estas variables se determinarán cuál de ellas es la más significativa cuando se analice la variable respuesta previo análisis de laboratorio de azúcares totales.

Tabla III-3 Diseño factorial para el proceso de la hidrolisis.

| Pruebas | MEA (gr) | pH (pH) | T (C°) | AZUCARES TOTALES (%) |
|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | - | - | - | |
| 2 | - | + | - | |
| 3 | + | - | - | |
| 4 | + | + | - | |
| 5 | - | - | + | |
| 6 | - | + | + | |
| 7 | + | - | + | |
| 8 | + | + | + | |

Fuente: elaboración propia, 2014.

Tabla III-4 Datos del diseño factorial en la hidrolisis.

| Pruebas | MEA (gr) | pH (pH) | T (C°) | AZUCARES TOTALES (%) |
|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 5,2 | 70 | |
| 2 | 2 | 6,2 | 70 | |
| 3 | 2.8 | 5,2 | 70 | |
| 4 | 2.8 | 6,2 | 70 | |
| 5 | 2 | 5,2 | 80 | |
| 6 | 2 | 6,2 | 80 | |
| 7 | 2.8 | 5,2 | 80 | |
| 8 | 2.8 | 6,2 | 80 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.8.1 OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE HIDROLISIS.

Para la optimización del tiempo se tomó muestras de la solución a diferentes tiempos de reacción del proceso de hidrólisis para realizar un seguimiento del aumento de azúcares formados en la solución.

3.5.9 INACTIVACIÓN DE LA ENZIMA α -AMILASA.

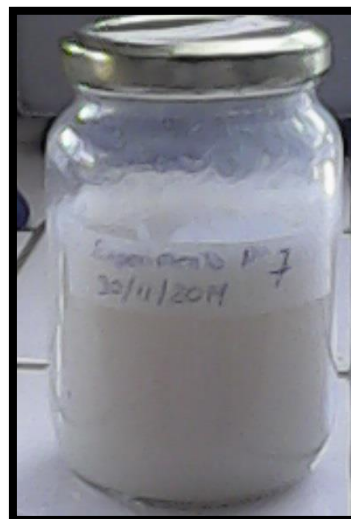
Al cabo de este tiempo se detuvo la acción enzimática mediante la adicción de HCl 0.1N para bajar el pH de la solución a 3,5 (ver figura 3-11) y luego se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente.

Figura 3-11 Inactivaciones de las enzimas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12 Muestra para el análisis.



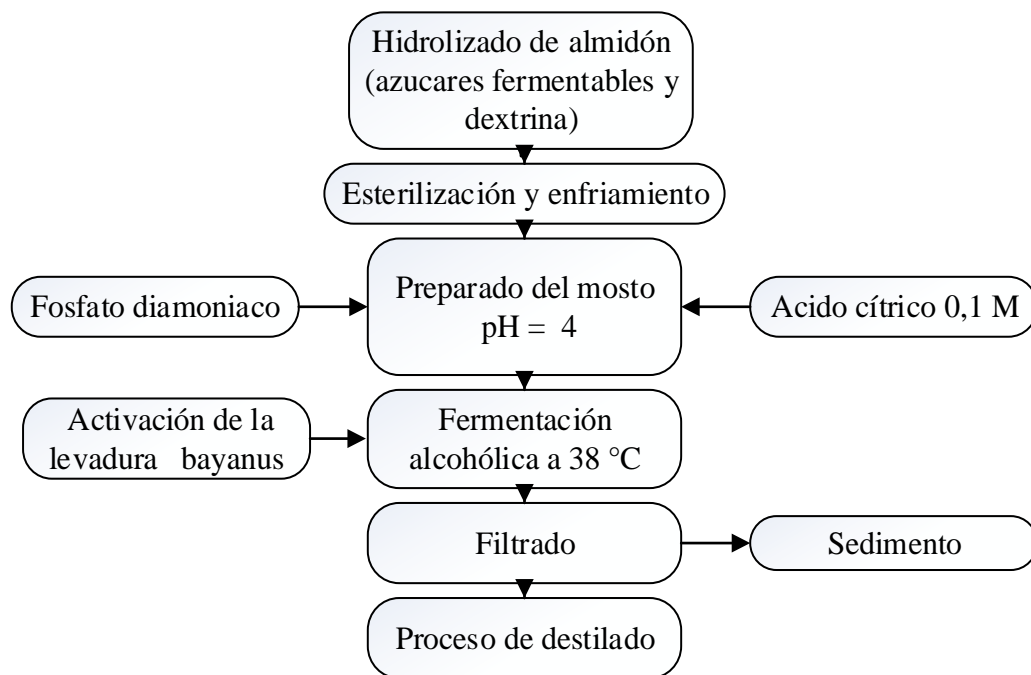
Fuente: Elaboración propia

3.6 PROCESO DE FERMENTACIÓN

Se realizó la fermentación del hidrolizado de almidón (dextrina y azúcares) utilizando las cantidades de levadura *Saccharomyces bayanus* PB2870 (máximo 30gr/hl - mínimo 20gr/hl), Temperatura de fermentación (máximo 40°C – mínimo 35°C) y pH máximo 4– mínimo 3.5 parámetros recomendados por el fabricante (VER ANEXO 8).

En la figura 3-13 se muestra el proceso de fermentación alcohólica y destilación.

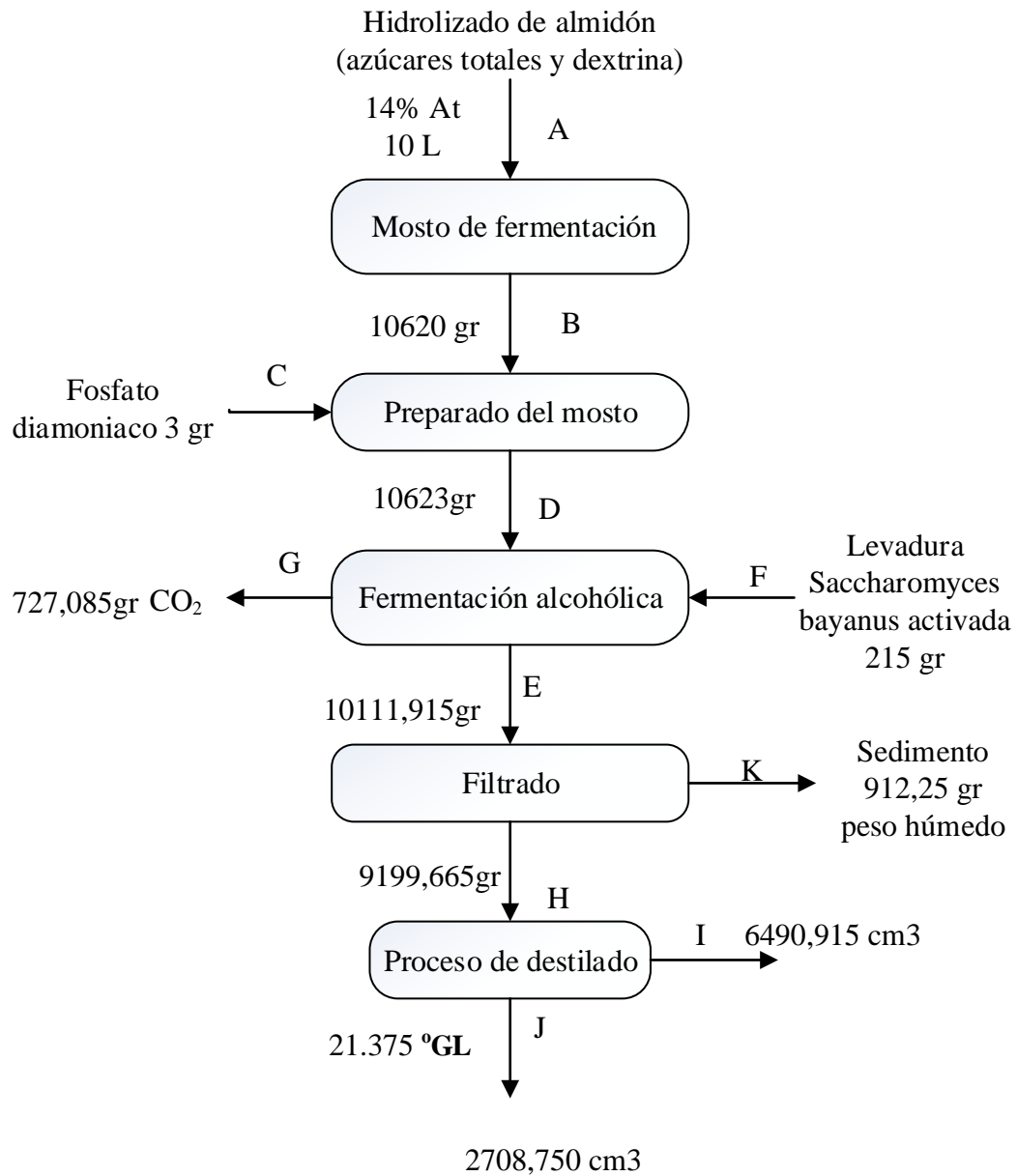
Figura 3-13 Diagrama de bloque del proceso de fermentación alcohólica y destilado.



Fuente: Elaboración propia, 2014

3.6.1 BALANCE DE MATERIA GENERAL

En la figura 3-14 se muestra el balance de materia del proceso (VER ANEXO 6)



Fuente: Elaboración propia.

Balance global: $A + C + F = G + K + I + J$

3.6.2 ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La esterilización de los materiales se llevó a cabo en autoclave Raypa (ver la figura 3-15); el interior del autoclave debe contener agua destilada a temperatura ambiente cubriendo la resistencia del equipo: una vez colocados los materiales se procede a cerrar la tapa y programar el equipo a 120°C y una presión de 1.5 bares.

Figura 3-15 Autoclave Raypa



Fuente: Elaboración propia

3.6.3 PREPARACIÓN DEL MOSTO

Una vez esterilizados los materiales se procedió a introducir 10 litros el mosto (azúcar y dextrina) en un porcentaje de azúcares totales del 14 % en un reactor (Polipropileno PP de 10 litros).

Se emplear fosfato diamónico ((NH₄)₂HPO₄), como único nutriente en el proceso, para asegurar el aporte de nitrógeno y fosforo al mosto. En una cantidad de 30gr/hl se ajustó el pH de la solución con ácido cítrico en un valor de 4.

Una vez ajustado el pH se calentó el mosto en un termostato J.P. Selecta a temperatura de 38 °C (VER ANEXO 9)

3.6.4 ESTERILIZACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Debido a la presencia de una variedad de células vegetales diferentes y de espora que proceden del medio del agua, aire y del recipiente estos microorganismos deben ser eliminados por un procedimiento adecuado antes de la inoculación de la levadura.

Se procedió a la esterilización del hidrolizado del almidón mediante calentamiento a 80°C una vez alcanzada la temperatura correcta. Se requiere 15 min para el proceso de muerte de los microorganismos, seguido del enfriamiento alcanzando una temperatura de fermentación de la levadura 38 °C.

3.6.5 ACTIVACIÓN LEVADURA SACCHAROMYCES BAYANUS

Activación del cultivo: se prepara 200 ml de solución que contenga 200 cm³ de agua destilada, 4 gr de cloruro de sodio (NaCl) y 8 gr de sacarosa. Se le agregó 3 gr de liofilizado de cepa pura de *Saccharomyces bayanus* se incubó a 38°C. Se espera el tiempo necesario hasta que se active el inóculo que se puede establecer al observar formación de espuma y burbujeo (ver figura 3-16) dióxido de carbono (CO₂).

Figura 3-16 *Saccharomyces bayanus* PB2870



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los materiales utilizados para la activación del liofilizado levadura *Saccharomyces bayanus* PB2870 fueron esterilizados para no realizar una contaminación cruzada al cultivo.

3.6.6 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Para el proceso de fermentación alcohólica se usó levadura *Saccharomyces bayanus* PB2870 previamente activada. Normalmente las levaduras actúan sobre la glucosa pero hay que considerar que el mosto obtenido por la hidrólisis del almidón es una mezcla de azúcares fermentables y dextrina. Por eso se recurrió a la levadura (hongo) *Saccharomyces bayanus* PB2870 que tiene una composición: levadura seca activa, lípidos, carbohidratos y enzima (proteínas) que hidroliza la dextrina del mosto de fermentación (VER ANEXO 8).

Una vez activada la levadura se adiciona al mosto (dextrina y azúcares) corregido que se encuentra en el recipiente de fermentación, se procedió a la agitación y tapar el recipiente; en la parte superior del recipiente de fermentación se debe tener una salida de gases (CO_2) (ver figura 3-17) para disminuir la presión del interior del fermentador.

Figura 3-17 Reactor de fermentación de 10 litros



Fuente: Elaboración propia.

La fermentación generalmente dura varios días, dependiendo de dos factores: temperatura, cantidad de levadura. Para determinar la culminación de la fermentación alcohólica se utilizó un areómetro baume Nahita (rango 0-50 °Be, calibrado: 20°C longitud total: 240 mm); al culminar la fermentación la densidad relativa del mosto es constante.

A lo largo de la fermentación, se tomaron muestras de 150 cm³ en un intervalo de tiempo de 48 horas para la determinación de la densidad relativa del mosto y el pH (VER ANEXO 3) y calcular el grado alcohólico.

3.6.7 FILTRADO

Posteriormente, culminada la fase de fermentación alcohólica se procedió al filtro al vacío de 5 litros de mosto con un equipo de filtrado equipado con: papel filtro, bomba de vacío modelo A 6611-04 (VER ANEXO 9), presión de vacío de 80 kPa por un tiempo aproximado de 5 horas. Para eliminar los sólidos presente (biomasa) (ver la figura 3-18).

Figura 3-18 Equipo de filtrado al vacío.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-19 Muestra filtrada



Fuente: Elaboración propia

3.6.8 DESTILACION

Se procedió a realizar la separación del producto de nuestro interés (etanol) mediante el proceso de destilación simple. Se lo realizó en un rota vapor Heidolph (ver figura 3-20) equipado con una bomba al vacío (VER ANEXO 9).

Se determinó la concentración de alcohol en grados Gay-Lussac (°GL) mediante el uso de un alcoholímetro Nahita (rango 0-100 % vol. (Gay Lussac) y 10-44° (Cartier), calibrado: 20°C, longitud total: 290 mm). Se tomó una muestra de 150 cm³ del volumen de destilado para la medición del grado alcohólico del destilado (VER ANEXO 4).

Figura 3-20 Rota vapor



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE ALMIDON EN CADA MUESTRA

Para la cuantificar de la cantidad de almidón que se encuentra en 250g de papa cardenal se procedió al secado en una estufa de 5 muestras, a 55 °C de temperatura y un tiempo determinado, hasta obtener un peso constante de las muestras (ver tabla IV-1).

Al extraer el almidón de papa cardenal se procedió a realizar el lavado con 500 cm³ de agua, dejando reposar por un periodo de 30 min que dura el proceso de sedimentado del almidón; luego se eliminó toda el agua superficial, dejando una muestra humedad (almidón y agua) con un peso de la muestra 1 de 70,01 gr.

Para eliminación el agua de la muestra se procedió a realizar el secado de la muestra 1 en una estufa J.P selecta por un periodo de 24.5 horas y una temperatura constante de 55 °C. Al culminar el proceso de secado de la muestra 1 tiene un peso seco de 31,34 gr.

En la tabla IV-1 Resultados obtenidos en el secado.

| Muestra | Cantidad de papa cardenal | Muestra | | Humedad Relativa % |
|---|---------------------------|-------------|-----------|--------------------|
| | | Peso húmedo | Peso seco | |
| 1 | 250gr | 70,01gr | 31,34gr | 55,23% |
| 2 | 250gr | 69,50gr | 30,02gr | 56,80% |
| 3 | 250gr | 72,83gr | 32,06gr | 55,97% |
| 4 | 250gr | 69,97gr | 31,20gr | 55,40% |
| 5 | 250gr | 71,83gr | 30,45gr | 57,60% |
| Masa de almidón en cada hidrólisis | | | 31.014 | 56,20% |

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Humedad relativa (US\%)} = \frac{\text{peso humedo} - \text{peso seco}}{\text{peso humedo}} * 100$$

$$\text{Humedad relativa (US\%)} = \frac{70.01\text{gr} - 31.34\text{gr}}{70.01\text{gr}} * 100 = 55.23 \%$$

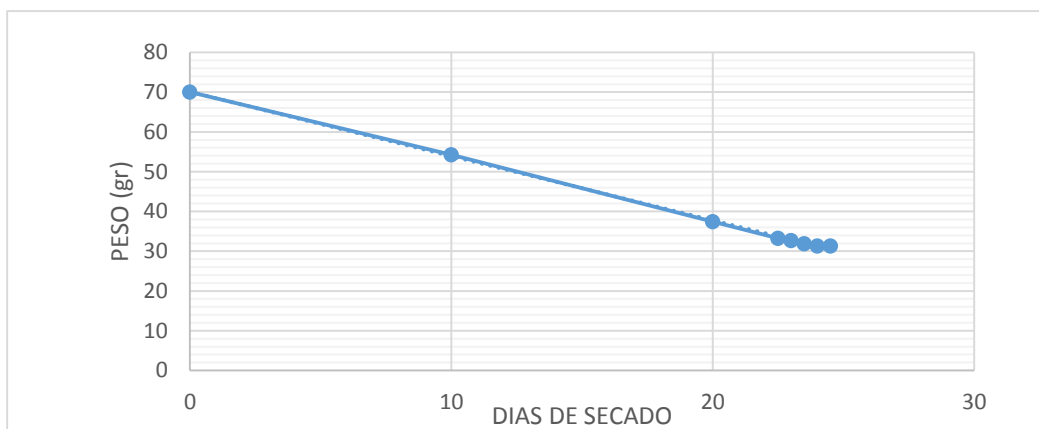
A partir de la curva de secado de la muestra 1 se procedió a calcular el tiempo óptimo de secado del almidón de papa cardenal que oscila entre los 24,5 horas (ver la gráfica IV-1).

En la tabla IV-2 Secado de la muestra 1

| | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Peso(g) | 70.01 | 54,23 | 37,40 | 33,29 | 32,7 | 31,85 | 31,34 | 31,34 |
| t(h) | 0 | 10 | 20 | 22,5 | 23 | 23,5 | 24 | 24,5 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico IV-1 Curva de secado muestra 1



Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos obtenidos en el secado se pudo cuantificar la masa de almidón que contiene 250g de papa cardenal y poder cuantificar el volumen de agua destilada en la hidrólisis a partir de la relación 1:10 sólido –líquido.

4.2 RESULTADOS DEL PROCESO DE HIDROLISIS

El grado de hidrolisis de un almidón se expresa generalmente en función del equivalente de dextrosa el cual está directamente relacionado con la cantidad de grupos libres de azúcares.

4.2.1 ANÁLISIS DE AZUCARES TOTALES

Las muestras de hidrolizado de almidón de papa cardenal fueron analizadas por el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID), cuyo resultados se expresa en la tabla IV-3 sustraídos de los datos, cálculos y resultados de azúcares totales (VER ANEXO 2).

Tabla IV-3 Resultados de azúcares totales.

| Muestra | MEA (gr) | pH-h (pH) | T (°C) | Azúcares Totales (%) | |
|---------|----------|-----------|--------|----------------------|------------|
| | | | | Análisis 1 | Análisis 2 |
| 1 | 2 | 5,2 | 70 | 5,31 | 6,70 |
| 2 | 2 | 6,2 | 70 | 5,12 | 5,35 |
| 3 | 2,8 | 5,2 | 70 | 10,26 | 10,21 |
| 4 | 2,8 | 6,2 | 70 | 6,42 | 6,75 |
| 5 | 2 | 5,2 | 80 | 4,50 | 5,69 |
| 6 | 2 | 6,2 | 80 | 6,64 | 5,65 |
| 7 | 2,8 | 5,2 | 80 | 11,06 | 10,90 |
| 8 | 2,8 | 6,2 | 80 | 7,05 | 5,35 |

Fuente: Elaboración propia

Se pudo notar que el porcentaje de azúcares totales oscila entre 5.31% y 11,06%; estos valores se calcularon en un periodo de 2 horas.

4.2.2 OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE HIDROLISIS

Una vez definidos los parámetros óptimos de la fase de hidrolizado se procedió a optimización del tiempo del proceso.

Para la optimización del tiempo se tomó muestras de la solución a diferentes tiempos (ver tabla IV-4) de reacción de hidrolizado para realizar un seguimiento del aumento de azúcares formados en el proceso (VER ANEXO 1).

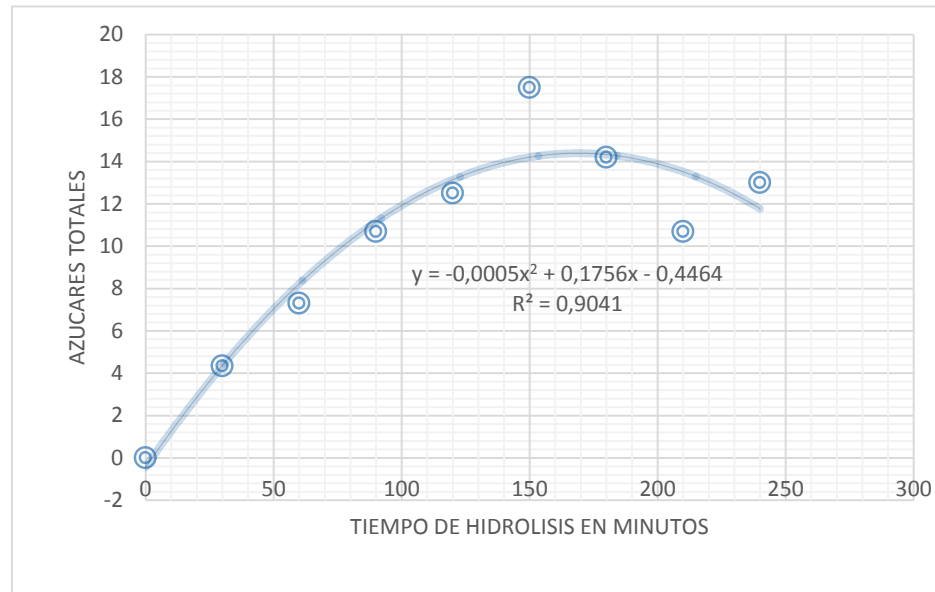
Tabla IV-4 Optimización del tiempo de hidrólisis

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Azúcares totales (%) | 0,0 | 4,35 | 7,30 | 10,70 | 12,50 | 17,50 | 14,20 | 10,70 | 13 |
| Tiempo (min) | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |

Fuente: Elaboración propia

A partir de la curva de hidrólisis del almidón de papa cardenal se procedió a calcular el tiempo óptimo del proceso de hidrólisis de 2 horas y 30 minutos (ver la gráfica IV-2) pasado este tiempo no se justifica seguir la reacción porque la producción no aumenta considerablemente.

Grafico IV-2 Curva de hidrólisis



Fuente: Elaboración propia

4.3 RESULTADOS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHOLICA

4.3.1 DATOS OBTENIDOS EN LA PRIMERA FERMENTACIÓN

Los datos obtenidos en la fermentación alcohólica fueron densidad relativa (gr/cm^3) y pH del mosto (ver tabla IV-5) en un tiempo de fermentación de 22 días.

Tabla IV-5 Datos obtenidos en la primera fermentación.

| Tiempo (días) | Grados Baume (°Be) | Densidad Relativa (gr/cm^3) | Grado Alcohólico (°GL) | pH Fermentación |
|---------------|--------------------|--|------------------------|-----------------|
| 0 | 8,03 | 1,059 | 0 | 4 |
| 5 | 6,48 | 1,047 | 1,575 | 3,96 |
| 7 | 6,08 | 1,044 | 1,968 | 3,95 |
| 9 | 5,68 | 1,041 | 2,362 | 3,92 |
| 11 | 5,28 | 1,038 | 2,756 | 3,91 |
| 13 | 5,01 | 1,036 | 3,018 | 3,87 |
| 15 | 3,51 | 1,025 | 4,462 | 3,74 |
| 17 | 3,1 | 1,022 | 4,856 | 3,68 |
| 19 | 2,82 | 1,02 | 5,118 | 3,6 |
| 21 | 2,55 | 1,018 | 5,381 | 3,55 |
| 22 | 2,55 | 1,018 | 5,381 | 3,48 |

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Grado Alcohólico (°GL)} = (\text{Dr}_{\text{inicial}} - \text{Dr}_{\text{final}}) * 131.25 \quad \text{Ec 3-1}$$

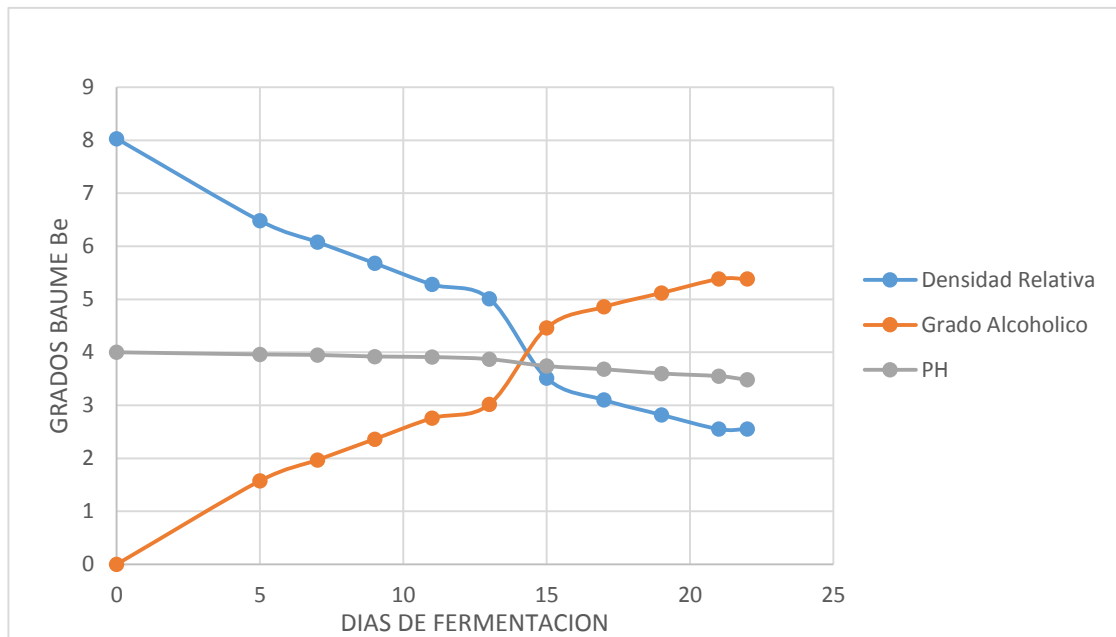
$$\text{Grado Alcohólico (°GL)} = (1,059 \text{ gr/cm}^3 - 1,018 \text{ gr/cm}^3) * 131.25 = 5.38 \text{ °GL}$$

Nota: Cabe mencionar que le grado alcohólico (°GL) calculado por la ecuación 3-1 es la cantidad de alcohol probable en la solución.

Se observa un descenso en la densidad relativa y pH del mosto en el transcurso de los días. La disminución de la densidad relativa se debe a la formación de etanol que tiene menor densidad que el agua.

Paralelamente se observa un incremento del grado alcohólico ($^{\circ}$ GL) proporcional a la disminución en la densidad relativa (ver gráfico IV-3).

Gráfico IV-3 Primera fermentación alcohólica.



Fuente: Elaboración propia

4.3.2 DATOS OBTENIDOS EN LA SEGUNDA FERMENTACIÓN

Los datos obtenidos en la fermentación alcohólica fueron densidad relativa (gr/cm^3) y pH del mosto (ver tabla IV-6) en un tiempo de fermentación de 24 días.

Tabla IV-6 Datos obtenidos en la segunda fermentación.

| Tiempo (días) | Grados Baume ($^{\circ}\text{Be}$) | Densidad Relativa (gr/cm^3) | Grado Alcohólico ($^{\circ}\text{GL}$) | pH FERMENTACION |
|---------------|--------------------------------------|---|--|-----------------|
| 0 | 8,5 | 1,062 | 0 | 4 |
| 5 | 6,5 | 1,047 | 1,968 | 3,97 |
| 7 | 6,0 | 1,043 | 2,493 | 3,94 |
| 9 | 5,5 | 1,040 | 2,887 | 3,91 |
| 11 | 5,2 | 1,038 | 3,150 | 3,91 |
| 13 | 4,7 | 1,034 | 3,675 | 3,87 |
| 15 | 3,7 | 1,027 | 4,593 | 3,84 |
| 17 | 2,8 | 1,020 | 5,512 | 3,78 |
| 19 | 2,2 | 1,016 | 6,037 | 3,74 |
| 21 | 2,0 | 1,015 | 6,168 | 3,69 |
| 22 | 1,8 | 1,013 | 6,431 | 3,62 |
| 24 | 1,8 | 1,013 | 6,431 | 3,55 |

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Grado Alcohólico } (^{\circ}\text{GL}) = (\text{Dr}_{\text{inicial}} - \text{Dr}_{\text{final}}) * 131.25$$

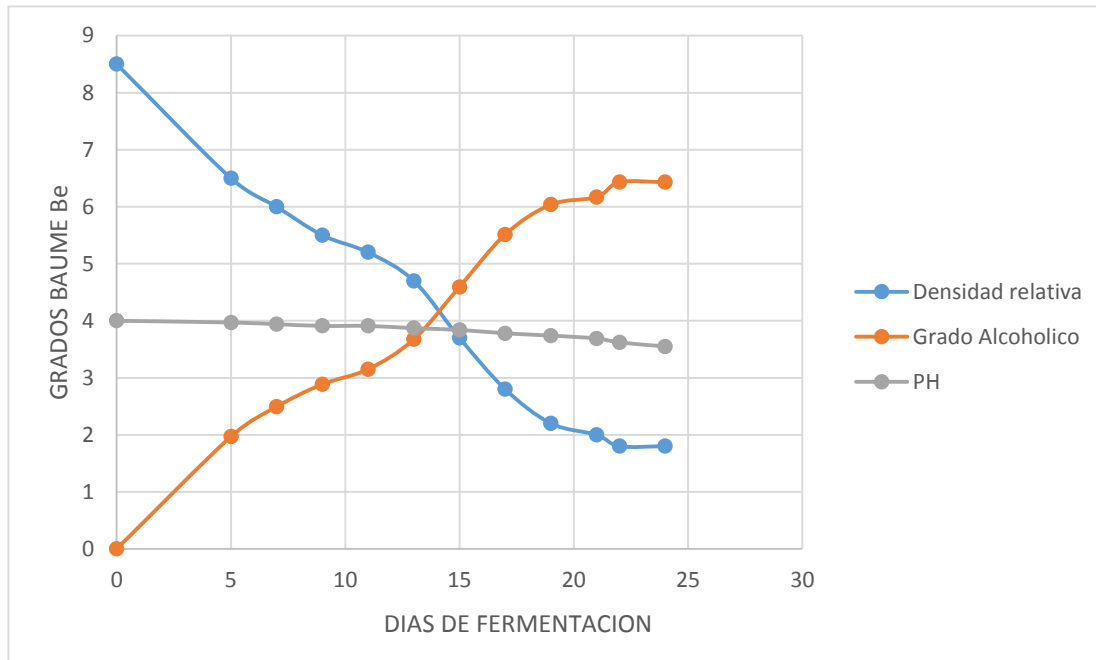
$$\text{Grado Alcohólico } (^{\circ}\text{GL}) = (1,062 \text{ gr}/\text{cm}^3 - 1,013 \text{ gr}/\text{cm}^3) * 131.25 = 6,431 ^{\circ}\text{GL}$$

Al comparar los resultados obtenidos en la primera fermentación y segunda fermentación alcohólica.

Se evidencio que en la primera fermentación hubo un descenso de la densidad relativa de 8,03 $^{\circ}\text{Be}$ a 2,55 $^{\circ}\text{Be}$ en el transcurso de 22 días. En la segunda fermentación el descenso de la densidad relativa de 8,5 $^{\circ}\text{Be}$ e 1,8 $^{\circ}\text{Be}$ en el transcurso de 24 días.

La diferencia de 2 días de fermentación y una disminución mayor de la densidad relativa de la segunda fermentación alcohólica alcanzo una taza mayor de formación de alcohol a 6,43 $^{\circ}\text{GL}$ (ver gráfico IV-4)

Gráfico IV-4 Segunda fermentación alcohólica.



Fuente: Elaboración propia

Los factores físicos que se deben considerar en la fermentación alcohólica son esencialmente el pH y la temperatura de fermentación.

La temperatura de fermentación del mosto (dextrina y azúcares) se conserva a temperatura constante de 38 °C que se encuentra dentro del intervalo especificado por el fabricante de (40 °C a 35 °C).

El pH de fermentación alcohólica según el fabricante de la levadura *Saccharomyces Bayanus PB2870* tiene un pH óptimo comprendido entre 4,0 y 3,5.

En la fermentación alcohólica se evidenció el descenso del pH de un valor inicial de 4 a 3,5. Al alcanzar un pH inferior de 3,5 se detiene toda actividad de la levadura *Saccharomyces Bayanus PB2870* y la formación de alcohol manteniendo una densidad relativa del mosto constante que indica la finalización de la fermentación alcohólica.

Los resultados obtenidos en la primera fermentación y segunda fermentación alcohólica, fueron satisfactorios debido a una aproximación de los resultados, que comprueba, un procedimiento correcto de preparación del mosto (dextrina y azúcares) para su posterior fermentación y la activación correcta de la levadura *Saccharomyces Bayanus PB2870*.

4.4 RESULTADOS DEL PROCESO DESTILACIÓN ALCOHÓLICA

4.4.1 DESTILACION ALCOHÓLICA

Finalmente para determinar la concentración del etanol producido a lo largo de la fermentación del mosto, se procedió a la destilar de las muestras del mosto filtrado en un destilador discontinuo. Los resultados se muestran en la tabla IV-7

Tabla IV-7 Resultados de la destilación discontinua.

| N | mosto filtrado (cm ³) | Resultados de la destilación | | Grado alcohólico producto de cabeza (°GL) | Volumen de alcohol destilado (cm ³) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| | | Producto de cabeza (cm ³) | Producto de cola (cm ³) | | |
| 1 | 1000 | 278 | 722 | 22,5 | 62,55 |
| 2 | 1000 | 287,5 | 712,5 | 21,5 | 61,8125 |
| 3 | 1000 | 250,5 | 749,5 | 20,5 | 51,3525 |
| 4 | 1000 | 267,5 | 732,5 | 21 | 56,175 |
| Promedio del Grado alcohólico | | | | 21.375 | 57,97 |

Fuente: Elaboración propia.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO FACTORIAL.

El análisis estadístico se realizó mediante SPSS 17.0 (Statistical package for the Social Sciences), el mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos obtenidos resultados más representativos y confiables.

Con el análisis de variación ANOVA se determina la influencia de los factores masa de enzimas, pH solución y temperatura de sus interacciones sobre la variable respuesta (azúcares totales %)

En la tabla IV-8 se muestra los datos introducidos al programa SPSS 17.0, de acuerdo al diseño factorial planteado: cada factor tiene un nivel superior (+1) y un nivel inferior (-1)

Tabla IV-8 Datos para el análisis de varianza

| N° ensayo | Factores | | | Variable respuestas |
|-----------|----------------------|----|------------------|----------------------|
| | Masa de enzimas (gr) | pH | Temperatura (°C) | Azúcares Totales (%) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 5,31 |
| 2 | -1 | +1 | -1 | 5,12 |
| 3 | +1 | -1 | -1 | 10,26 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 6,42 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 4,50 |
| 6 | -1 | +1 | +1 | 6,64 |
| 7 | +1 | -1 | +1 | 11,06 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 7,05 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | 6,70 |
| 10 | -1 | +1 | -1 | 5,35 |
| 11 | +1 | -1 | -1 | 10,21 |
| 12 | +1 | +1 | -1 | 6,75 |
| 13 | -1 | -1 | +1 | 5,69 |
| 14 | -1 | +1 | +1 | 5,65 |
| 15 | +1 | -1 | +1 | 10,90 |
| 16 | +1 | +1 | +1 | 5.35 |

Fuente: SPSS 17.0

En la tabla IV-9 se muestran las variables del diseño factorial y el número de experiencias para cada variable que está registrada mediante el programa y realizada en la parte experimental para un diseño de 2^3 con dos repeticiones y un total de 16 experimentos, con la variable respuesta.

Tabla IV-9 Factores inter-sujetos

| | | N |
|-----------------|-------|---|
| Masa de enzimas | -1,00 | 8 |
| | 1,00 | 8 |
| pH | -1,00 | 8 |
| | 1,00 | 8 |
| Temperatura | -1,00 | 8 |
| | 1,00 | 8 |

Fuente: SPSS 17.0

4.5.1 VARIABLE RESPUESTA PORCENTAJES DE AZUCARES TOTALES

En la tabla IV-10 se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variable respuesta porcentajes de azúcares totales, tomando en cuenta los factores masa de enzimas, pH de solución y temperatura, así como sus interacciones.

Tabla IV-10 Análisis de varianza ANOVA
(porcentajes de azúcares totales)

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---------------------------|----------------------------|----|------------------|----------|------|
| Modelo corregido | 68,933 ^a | 6 | 11,489 | 17,586 | ,000 |
| Intersección | 797,498 | 1 | 797,498 | 1220,717 | ,000 |
| Masa de enzimas | 33,178 | 1 | 33,178 | 50,784 | ,000 |
| pH | 16,606 | 1 | 16,606 | 25,418 | ,001 |
| Temperatura | ,032 | 1 | ,032 | ,050 | ,829 |
| Masa de enzimas * pH | 18,966 | 1 | 18,966 | 29,031 | ,000 |
| Masa enzimas* Temperatura | ,032 | 1 | ,032 | ,050 | ,829 |
| pH * Temperatura | ,119 | 1 | ,119 | ,182 | ,680 |
| Error | 5,880 | 9 | ,653 | | |
| Total | 872,310 | 16 | | | |
| Total corregida | 74,813 | 15 | | | |

a. R cuadrado = ,921 (R cuadrado corregida = ,869)

Fuente: SPSS 17.0

Es posible señalar a las variable más significativa con un nivel de confianza del 95%, es decir, variable que poseen una significancia menor al 5% (0,05). La variable temperatura tiene un nivel de significancia mayor al 5% (0.829); por tanto, queda descartada, así como su interacción.

Se realiza nuevamente el análisis de varianza con los factores masa de enzimas y pH

Tabla IV-11 Factores inter-sujetos

| | | N |
|-----------------|-------|---|
| Masa de enzimas | -1,00 | 8 |
| | 1,00 | 8 |
| pH | -1,00 | 8 |
| | 1,00 | 8 |

Fuente: SPSS 17.0

En la tabla IV-12 se puede observar el análisis de varianza para la variable dependiente o variables respuestas porcentajes de azúcares totales.

Tabla IV-12 Análisis de Variable ANOVA

Variable dependiente: azúcares totales

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---------------------|----------------------------|----|------------------|----------|------|
| Modelo corregido | 68,749 ^a | 3 | 22,916 | 45,352 | ,000 |
| Intersección | 797,498 | 1 | 797,498 | 1578,279 | ,000 |
| Masa de enzimas | 33,178 | 1 | 33,178 | 65,660 | ,000 |
| pH | 16,606 | 1 | 16,606 | 32,863 | ,000 |
| Masa de enzimas* pH | 18,966 | 1 | 18,966 | 37,534 | ,000 |
| Error | 6,064 | 12 | ,505 | | |
| Total | 872,310 | 16 | | | |
| Total corregida | 74,813 | 15 | | | |

a. R cuadrado = .919 (R cuadrado corregida = .899)

Fuente: SPSS 17.0

Se puede verificar que al 95% del nivel de confianza, las variables masa de enzimas y pH, así como sus interacciones son significativas.

4.5.2 ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona las variables más significativas con la variable respuestas. Para el análisis de regresión, se introdujo al SPSS las variables masa de enzimas y pH.

Tabla IV-13 Variables Introducidas/Eliminadas ^b

| Modelo | Variables introducidas | Variables eliminadas | Método |
|--------|----------------------------|----------------------|------------|
| 1 | Masa de enzimas, pH, Masa, | . | Introducir |

- a. Todas las variables solicitadas introducidas.
- b. Variables dependiente: azúcares totales

Fuente: SPSS 17.0

Tabla IV-14 Resumen del Modelo ^b

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | ,959 ^a | ,919 | ,899 | ,71084 |

- a. Variables predictoras (constante), masa de enzimas, masa de enzimas y pH
- b. Variables dependiente azúcares totales

Fuente: SPSS 17.0

Tabla IV-15 ANOVA ^b

| Modelo | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-------------|-------------------|----|------------------|--------|-------------------|
| 1 Regresión | 68,749 | 3 | 22,916 | 45,352 | ,000 ^a |
| Residual | 6,064 | 12 | ,505 | | |
| Total | 74,813 | 15 | | | |

a. Variables predictoras: masa de enzimas, pH, masa de enzimas y pH

b. Variables dependiente azúcares totales

Fuente: SPSS 17.0

Tabla IV-16 Coeficiente ^a

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. |
|--------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|--------|------|
| | B | Error típ. | Beta | | |
| 1 (Constante) | 7,060 | ,178 | | 39,728 | ,000 |
| Masa de enzimas | 1,440 | ,178 | ,666 | 8,103 | ,000 |
| pH | -1,019 | ,178 | -,471 | -5,733 | ,000 |
| Masa de enzimas*pH | -1,089 | ,178 | -,504 | -6,127 | ,000 |

a. Variables dependiente azúcares totales

Fuente: SPSS 17.0

Por lo tanto, a partir de los coeficientes proporcionados en la tabla IV-16 la ecuación matemática es la siguiente.

$$\% \text{ azúcares totales} = 7,060 + 1,440 * A - 1,019 * B - 1,089 * A * B$$

Donde A es la masa de enzimas y B es el pH de la solución; a partir de esta ecuación se puede enunciar que a mayor masa de enzimas α -amilasa mayor es el porcentaje de azúcares totales y al aumentar el pH disminuye la concentración de azúcares totales y lo mismo sucede con su interacciones pues posee un coeficiente negativo.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

- El porcentaje de almidón seco que se encuentra en 250g de papa cardenal se cuantifico mediante el secado de 5 muestras de almidón previamente lavada a 55 °C de temperatura y un tiempo determinado de 24 horas, obteniendo una masa promedio de 31.014 gr de almidón seco. Al obtener la masa se cuantifica el volumen de agua destilada para el proceso de hidrolisis a partir de la relación 1:10 solido-liquido.
- La presente investigación determino que por cada 1000 gr de papa cardenal es posible obtener 124.059 gr de almidón. Obteniendo un rendimiento del 12,959 %.
- Como resultado de los ensayos programados por el diseño factorial del proceso de hidrolisis la combinación óptima para el proceso es: masa de enzima α -amilasa de 2,8 gr (+), pH de solución 5,2 (-) y temperatura 80 °C (+) siendo esta la mejor combinación del proceso. Al obtener mayor concentración de azúcares totales expresados en porcentaje de 11,06% en un tiempo de 2 horas
- Para maximizar la producción de azúcares del proceso de hidrólisis se procedió a la optimización del tiempo de reacción: alcanzando una producción de azúcares totales de 14,0% en un tiempo de reacción de 2 horas y 30 minutos. Pasado este tiempo no se justifica seguir la reacción porque la producción no aumenta considerablemente.
- Mediante el análisis estadístico con el programa SPSS 17.0 la variable temperatura se descarta al no influir en gran manera en el proceso; se puede explicar debido a que se trabajó con intervalos de temperatura cercanos entre (70 y 80) °C.
- Teóricamente es posible obtener de un gramo de almidón 1.11gr de glucosa por relación estequiometrica. La presente investigación determinó que por cada gramo

de almidón es posible obtener 1.489 gramos de glucosa. El incremento se justifica por el ingreso de una masa mayor de almidón al proceso de hidrólisis debido a que no se cuantificó la masa de cada muestra, solo se procedió a obtener una masa promedio de almidón que ingresa al proceso de hidrólisis. La concentración de almidón en la papa cardenal depende de variables factores como ser: temperatura de la región, la humedad de la región y tipo de fertilizantes utilizados en el terreno.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Extender el estudio concerniente a hidrólisis enzimática de los residuos lignocelulosico del proceso tales como pulpa de papa cardenal y cascara de papa para aumentar el rendimiento en los proceso de hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica.
- Llevar a cabo un análisis de hidrólisis enzimática del almidón de papa cardenal con una variable de concentración de cloruro de calcio (CaCl_2) en la solución.
- Desarrollar un estudio concerniente a la hidrólisis enzimática con otros compuestos. Fuentes ricas en almidón, como cereales (maíz, trigo, cebada, etc.) y de tubérculos (yuca, biomato, etc.); materiales ricos en celulosa, madera y los residuos agrícolas, previa eliminación del lignito.
- Complementar el presente estudio con un diseño factorial en el proceso de fermentación alcohólica, con el propósito de mejorar el rendimiento obtenido de alcohol que por motivos económicos no se pudo realizar.
- Realizar un análisis cuantitativo y cualitativo del sedimento para conocer los compuestos que pueden estar inmersos en dicho residuos con el propósito de elevar si es viable su aprovechamiento para investigaciones posteriores.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- **Ariel, Ruiz. (2009).** *La seguridad Energética De América Latina Y El Caribe En El Contexto Mundial* [libro en línea]. Serie de investigación (CEPAL). Fecha de consulta: 30 de marzo 2014. Disponible en:
<http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/32123/lc12828e.pdf>
- **Abad, M. (2013).** *Biocombustibles*. [libro en línea]. Serie de investigadores (Anuario OPYPA 2013). Fecha de consulta 8 de abril de 2014. Disponible en:
<http://www.mgap.gub.uy/opypa/ANUARIOS/Anuario2013/material/pdf/pdf>
- **Ballesteros, M. (2006, noviembre 2).** *Carburante Sin Petróleo: Bioetanol*. Investigación y Ciencia [artículo en línea]. pp 79-80. Fecha de consulta 1 de abril de 2014. Disponible en: <http://www.investigacionyciencia.es/files/5392.pdf>
- **Brumovsky, L. (2010).** *Química del Almidón*. Fecha de consulta 8 de abril de 2014, de: <http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/>
- **Centro Internacional de la Papa (CIP), (2012, noviembre 8).** *Producción de papa da \$us 335 millones*. [La Prensa]. pp 10. Fecha de consulta: 4 abril 2014. Disponible en:
http://www.laprensa.com.bo/diario/actualidad/economia/20121108/produccion-de-papa-da-us-335-millones_37399_59852.html
- **Dickinson, J. et al. (2003, febrero 3).** *Metabolism and molecular physiology of Saccharomyces cerevisiae*. Inc, 4° ed London.
- **Instituto Nacional de Estadística (INE). (2013, septiembre 15).** *Estadísticas Del Cultivo De Papa*. Fecha de consulta: 4 abril 2014, de:
<http://www.agrobolivia.gob.bo/compendio2012/files/assets/downloads/page0087.pdf>

- **Instituto de Innovación Agraria y Forestal (INIAF), (2013, abril 24).** *Al año, cada boliviano consume un promedio de 92 kilos de papa.* [Radio FM Bolivi.Net]. pp 1. Fecha de consulta: 4 abril 2014. Disponible en: <http://www.fmbolivia.net/noticia58735-al-ao-cada-boliviano-consume-un-promedio-de-92-kilos-de-papa.html>
- **Instituto Nacional de Estadística (INE). (2013, septiembre 15).** *Estadísticas Del Cultivo De Papa.* Fecha de consulta: 4 abril 2014, de: <http://www.agrobolivia.gob.bo/compendio2012/files/assets/downloads/page0087.pdf>
- **Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2007).** *Atlas de la Agroenergía y los Biocombustibles en las Américas.* [Libro en línea]. Serie de investigadores (IICA, 2007). Fecha de consulta 5 de mayo de 2014. Disponible en: <http://www.iica.int>
- **Mateos, P. (2010).** *Tipos de Fermentadores.* Fecha de consulta 5 de junio de 2014, de: <http://darwin.usal.es/profesores/pfmg/sefin/MI/tema12MI.html>.
- **Márquez y Zabala. (2008, febrero 18).** *Respiración Celular.* Fecha de Consulta 10 de agosto 2014, de: <http://genomasur.com/lecturas.htm>.
- **Moreno, B. N. (1986).** *Determinación de los parámetros experimentales para la obtención de hojuelas de papa deshidratada.* Investigación aplicada (Licenciatura en Ing. química). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Santa fé de Bogotá (Colombia).
- **Sarah Dougherty (2006, noviembre 3).** *El debate energético: ¿Es el etanol la solución?.* Fecha de consulta: 30 de marzo de 2014, de: https://www.frbatlanta.org/pubs/econsouth/06q3-espanol_el_debate_energetico_es_el_etanol_la_solucion.cfm.

- **Sánchez y Cardona. (2005, noviembre 1).** *Producción biotecnológica de alcohol carburante: obtención a partir de diferentes materias primas.* Interciencia [artículo en línea]. Vol. 30. pp 673. Fecha de consulta 5 de agosto de 2014. Disponible en: <http://interciencia@ivic.ve>.
- **Sonia Liliana Pertuz Cruz.** *LA PAPA (Solanum Tuberosum L) Composición química y valor nutricional del tubérculo.* Fecha de consulta 30 de marzo de 2014, de: <http://www.fedepapa.com/wp-content/uploads/pdf/memorias/podernutricional.pdf>.
- **Ocon y Tojo, (2005).** *Problemas de Ingeniería Química.* Editorial Warren I. Mccabe. company Inc., 7º ed España,
- **Pardo y Rivera. (2004, marzo 2).** *Estudio cinético de la hidrólisis enzimática de almidón de papa.* Investigación y Ciencia [artículo en línea]. pp 66-80. Fecha de consulta 1 de abril de 2014. Disponible en: <http://www.ingenieriadeinvestigacioniNº54.es/files/5592.pdf>
- **Vázquez y Dacosta. (2007, mayo 1).** *Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas.* scielo.unam.mx. [artículo en línea]. pp 252. Fecha de consulta 15 de agosto de 2014. Disponible en: <http://scielo.unam.mx/pdf/iit/v8n4/v8n4a4.pdf>
- **Villada, P. (2010).** *Determinación experimental de las condiciones de operación para el proceso de hidrólisis enzimática del almidón de yuca nativa de la región amazónica.* Investigación aplicada (Licenciatura en Ing. química). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Bogotá (Colombia).

ANEXOS

ANEXOS 3

**PROCEDIMIENTO PARA LA
DETERMINACIÓN DE ALCOHOL
EN EL MOSTO DE FERMENTACIÓN**

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DE ALCOHOL EN EL MOSTO DE FERMENTACION

MÉTODO AREOMÉTRICO

El densímetro o areómetro es un instrumento cuyo fin es estimar la concentración de azúcares y alcohol (esto último, en el producto terminado). Se basa en el hecho que todo cuerpo sumergido en un líquido desplaza un volumen de líquido de igual peso que el propio de esta manera, al sumergirse el densímetro, se hundirá más cuanto más liviano sea el líquido y menos cuando más pesado.

Pero el peso del agua desplazada no es la única fuerza que actúa: también lo hace la tensión superficial y los roces, por lo que al medir se debe usar un recipiente suficientemente amplio para que no se toque el aparato con la pared. Asimismo es conveniente que la superficie esté libre de burbujas, y que los gases disueltos (CO₂ en este caso) no generen burbujas que se peguen y lo eleven artificialmente. Sucede algo similar con la espuma de superficie.

Como los coeficientes de dilatación de los líquidos y el vidrio no son iguales, al cambiar la temperatura de medida cambia la relación volumen-peso del densímetro y el líquido de manera dispar; de forma que la medición es relacionada con una temperatura específica para cada densímetro

Un hidrómetro o densímetro, mide la diferencia de densidad entre el agua pura y agua con azúcar disuelta. A mayor cantidad de azúcar disuelta mayor será la flotabilidad del instrumento. El hidrómetro se usa para medir el progreso de la fermentación a través de una de sus características, la atenuación. Atenuación es la conversión del azúcar en alcohol (etanol) a través de las levaduras. El agua tiene una densidad de 1.000. Las cervezas normalmente tienen una densidad entre 1.015 y 1.005.

El champagne y licores pueden tener densidades menores a 1.000, porque contienen gran cantidad de alcohol, el cual tiene una densidad menor a 1.000. Las lecturas de los hidrómetros están estandarizadas a 20°C.

MATERIAL

Vaso de precipitación 600 cm³

Probeta graduada de 100 o 200 cm³.

Termómetro contrastado de 0-100 °C

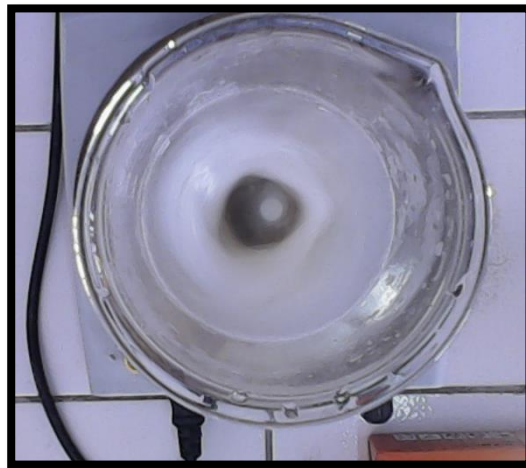
Areómetro baume Nahita (rango 0-50 °Be, calibrado: 20°C longitud total: 240 mm)

Agitador magnético

PREPARACION DE LA MUESTRA

Eliminar el CO₂, para lo cual, la muestra se transfiere a un vaso de precipitación cuyo volumen debe ser mayor al de la muestra y llevar a una temperatura de 20°C. Eliminar el gas, agitar el recipiente, al principio suavemente y después vigorosamente, hasta que no se observe desprendimiento de gas del mosto.

Eliminación del CO₂ por agitación



Fuente: Elaboración propia

Nota Si la muestra contiene materiales en suspensión, filtrar el líquido libre de CO² a través de papel de filtro, cubriendo el embudo con un vidrio de reloj para reducir la evaporación.

Se introduce el termómetro, se agita con el mismo la muestra y se hace la lectura. Se retira el termómetro y se introduce el densímetro en la probeta a una temperatura de calibración de 20 °C (si flota por debajo del tallo introducir uno de mayor graduación y si se sumerge totalmente introducir uno de menor). Cuando el densímetro se mantenga inmóvil, efectuar la lectura de la densidad relativa por la parte superior del menisco.

Determinación de la densidad relativa



Fuente: Elaboración propia

Areómetro baume Nahita



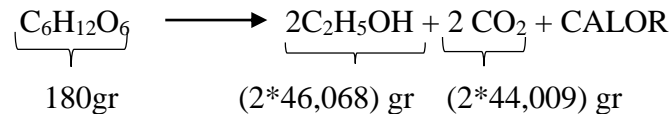
Fuente: Elaboración propia

CALCULAR EL PORCENTAJE DE ALCOHOL EN EL MOSTO DE FERMENTACIÓN

Para la determinación con exactitud el porcentaje de alcohol del mosto se debe medir su densidad antes de la fermentación usando el densímetro como se ha explicado anteriormente δ densidad inicial. Una vez hayan transcurrido los días designados de fermentación habrá que tomar una segunda lectura denominada δ densidad final.

Esta lectura siempre será menor, por dos razones: La primera es porque la levadura ha consumido parte de las azúcares disueltas en el mosto, y la segunda es porque ya existe un contenido de alcohol en el líquido, el cual es menos denso que el agua, a razón de 0.8 gr por cm^3 .

La Glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) es el azúcar principal que es convertida en alcohol por la levadura. Convierten cada molécula de Glucosa en dos moléculas de Alcohol Etilico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) y dos moléculas de Dióxido de Carbono (CO_2).



Por cada 44.009 gr de CO_2 que se escapan, 46.068 gr $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ han sido formados. O bien, por cada gramo de CO_2 , 1.05 gr $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ han sido ganados.

Entonces ahora podemos calcular el contenido de Alcohol en el mosto de fermentación.

Peso de CO_2 que escapa del reactor = $(\delta_{\text{inicial}} - \delta_{\text{final}})$

Peso de CO_2 que escapa del reactor $(1,062\text{ gr}/\text{cm}^3 - 1,013\text{ gr}/\text{cm}^3) = 0,049\text{ gr}/\text{cm}^3$

$$\text{Peso de alcohol en el mosto} = \frac{0,049 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \text{CO}_2 * 1,05 \text{ gr C}_2\text{H}_5\text{OH}}{1 \text{ grCO}_2} =$$

$$\text{Peso de alcohol en el mosto} = 0,05145 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

$$\% \text{ de alcohol en el mosto} = \frac{\text{Peso de alcohol en el mosto}}{\text{Peso del mosto } \delta_{\text{final}}} * 100$$

$$\% \text{ de alcohol en el mosto} = \frac{0,05145 \text{ gr/cm}^3}{1,013 \text{ gr/cm}^3} * 100 = 5,144 \%$$

Es el porcentaje de alcohol por peso, que tiene la muestra. Sin embargo es más común representar el porcentaje de alcohol en volumen (°GL). Entonces para obtener el porcentaje de alcohol en volumen, sólo hay que dividirlo por la densidad del alcohol 0.8 gr/cm^3 , lo que nos da: $5,144/0,8 = 6,431 \text{ °GL}$

Ahora, entendemos cómo calcular el porcentaje de alcohol en nuestra de mosto. Pero esto de los pesos moleculares y las densidades puede ser un tanto complejo, así que si resumimos las relaciones anteriores, podemos quedarnos con una sencilla e infalible fórmula para calcular el porcentaje de alcohol en volumen.

$$(\delta_{\text{inicial}} - \delta_{\text{final}}) * (1,05 * 100) / 1,013 = (\delta_{\text{inicial}} - \delta_{\text{final}}) 131.25$$

$$\text{Porcentaje de Alcohol en Volumen} = (1,062 \text{ gr/cm}^3 - 1,013 \text{ gr/cm}^3) * 131.25 =$$

$$\text{Porcentaje de Alcohol en Volumen} = 6,431 \text{ °GL}$$

Nota: Cabe mencionar que le grado alcohólico (°GL) calculado por la ecuación es la cantidad de alcohol probable en el mosto.

TABLAS DE CONVERSIÓN DE UNIDADES DE MEDIDA

| Densidad relativa | Grado Baumé | Grado Brix | Alcohol probable | | | | |
|-------------------|-------------|------------|------------------|------|------|------|------|
| 1000 | 0 | | | 1033 | 4.60 | 5.80 | 3.42 |
| 1001 | 0.14 | | | 1034 | 4.74 | 6.07 | 3.54 |
| 1002 | 0.28 | | | 1035 | 4.88 | 63.3 | 3.71 |
| 1003 | 0.43 | | | 1036 | 5.01 | 6.6 | 3.7 |
| 1004 | 0.57 | | | 1037 | 5.15 | 6.9 | 4.0 |
| 1005 | 0.71 | | | 1038 | 5.28 | 7.2 | 4.2 |
| 1006 | 0.85 | | | 1039 | 5.41 | 7.4 | 4.4 |
| 1007 | 1.00 | | | 1040 | 5.50 | 7.6 | 4.5 |
| 1008 | 1.14 | | | 1041 | 5.68 | 8.0 | 4.7 |
| 1009 | 1.28 | | | 1042 | 5.81 | 8.2 | 4.8 |
| 1010 | 1.42 | | | 1043 | 5.95 | 8.4 | 5.0 |
| 1011 | 1.56 | | | 1044 | 6.08 | 8.7 | 5.1 |
| 1012 | 1.70 | 0.20 | 0.11 | 1045 | 6.21 | 9.0 | 5.3 |
| 1013 | 1.84 | 0.47 | 0.23 | 1046 | 6.34 | 9.2 | 5.4 |
| 1014 | 1.98 | 0.73 | 0.43 | 1047 | 6.48 | 9.5 | 5.6 |
| 1015 | 2.12 | 1.10 | 0.59 | 1048 | 6.61 | 9.8 | 5.7 |
| 1016 | 2.27 | 1.26 | 0.70 | 1049 | 6.74 | 10.0 | 5.9 |
| 1017 | 2.41 | 1.53 | 0.88 | 1050 | 6.87 | 10.3 | 6.0 |
| 1018 | 2.55 | 1.80 | 1.06 | 1051 | 7.00 | 10.6 | 6.2 |
| 1019 | 2.68 | 2.06 | 1.18 | 1052 | 7.13 | 10.8 | 6.3 |
| 1020 | 2.82 | 2.33 | 1.35 | 1053 | 7.26 | 11.1 | 6.5 |
| 1021 | 2.91 | 2.59 | 1.47 | 1054 | 7.39 | 11.4 | 6.7 |
| 1022 | 3.10 | 2.86 | 1.65 | 1055 | 7.52 | 11.6 | 6.8 |
| 1023 | 3.24 | 3.13 | 1.82 | 1056 | 7.65 | 11.9 | 7.0 |
| 1024 | 3.37 | 3.39 | 1.94 | 1057 | 7.78 | 12.2 | 7.2 |
| 1025 | 3.51 | 3.66 | 2.21 | 1058 | 7.91 | 12.4 | 7.3 |
| 1026 | 3.65 | 3.92 | 2.30 | 1059 | 8.03 | 12.7 | 7.5 |
| 1027 | 3.79 | 4.19 | 2.41 | 1060 | 8.16 | 13.0 | 7.6 |
| 1028 | 3.92 | 4.46 | 2.69 | 1061 | 8.29 | 13.2 | 7.8 |
| 1029 | 4.06 | 4.72 | 2.77 | 1062 | 8.42 | 13.5 | 7.9 |
| 1030 | 4.20 | 5.00 | 2.95 | 1063 | 8.55 | 13.8 | 8.1 |
| 1031 | 4.33 | 5.27 | 3.06 | 1064 | 8.67 | 14.0 | 8.2 |
| 1032 | 4.47 | 5.54 | 3.24 | 1065 | 8.80 | 14.3 | 8.4 |
| | | | | 1066 | 8.93 | 14.6 | 8.6 |
| | | | | 1067 | 9.06 | 14.8 | 8.7 |

Fuente: gisiberica.com.

ANEXO 4

PROCEDIMIENTO PARA LA

DETERMINACIÓN DE ALCOHOL EN

MUESTRA DESTILADA

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE ALCOHOL EN MUESTRA DESTILADA

MÉTODO ALCOHOLÍMETRO

El alcoholímetro permite medir el porcentaje del alcohol en una solución de agua y de alcohol (conocido como destilado) y suministra una lectura del nivel de alcohol exacto y constante en el momento de la salida del destilado.

Grado alcohólico: Es el volumen de alcohol etílico, expresado en centímetros cúbicos, contenido en 100 cm³ de bebida alcohólica, a una temperatura determinada.

Grado aparente: A una temperatura diferente a la de referencia. La lectura de un grado aparente debe darse siempre indicando la temperatura a la cual dicha lectura fue tomada. También se considera grado aparente la lectura alcoholimetría de una mezcla que no sea pura, debido a la adición de sustancia que altera la densidad de la mezcla. En este caso, para determinar el grado alcohólico real, debe someterse a un proceso de destilación, hasta obtener una mezcla hidroalcohólica pura.

Este modelo incluye una escala de Cartier y de Gay Lussac. La escala Cartier fue introducida en 1771 para controlar el licor y substituida por la escala de Gay Lussac en 1824 que indica la concentración de alcohol en volumen.

MATERIAL

- Alcoholímetro Nahita (rango 0-100 % vol. (Gay Lussac) y 10-44° (Cartier), calibrado: 20°C, longitud total: 290 mm).
- Termómetro graduado en grado Celsius (°C).
- Probeta de capacidad y diámetro adecuados para evitar rozamiento con el alcoholímetro.

PROCEDIMIENTO

Se mide 100 ml de la muestra destilada en un vaso de precipitación, anotando su temperatura. Se lleva la muestra a una probeta de capacidad de 150 cm³ previamente enjuagada con agua destilada

Se coloca la probeta con la muestra sobre una superficie plana (la probeta debe estar perfectamente vertical).

Se coloca el alcoholímetro cuidando que este no toque las paredes de la probeta y se toma la lectura en % vol °GL.

Alcoholímetros Nahita



Fuente: Elaboración propia.

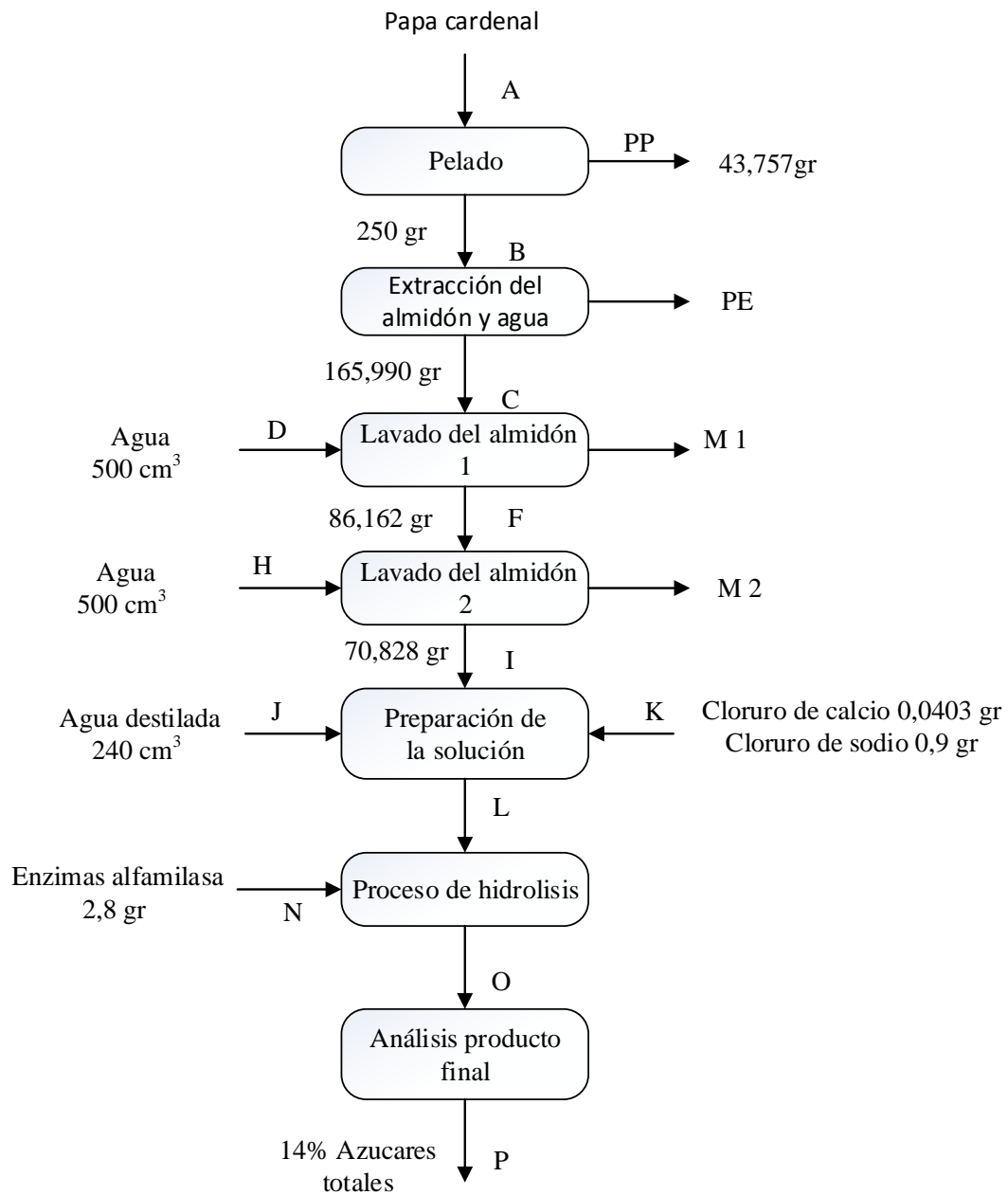
Determinación del grado alcohólico (°GL)



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 5
BALANCE DE MATERIA PROCESO DE
HIDROLISIS

BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE HIDROLISIS



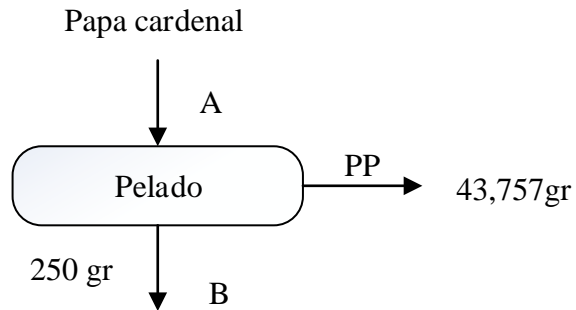
Fuente: Elaboración propia

Balance global:

$$A+D+H+J+N+K = PP+PE+M1+M2+P$$

$$A+500+500+240+2.8 = 43.757+PE+M1+M2+P$$

BALANCE DE MATERIA PARA CADA PROCESO

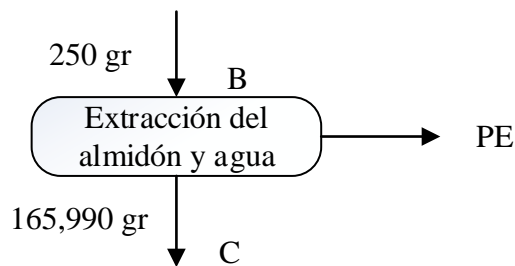


Balance en el pelado: $A = B + PP$

$$A = 250 \text{ gr} + 43,757 \text{ gr} = 293,757 \text{ gr}$$

PP = Masa de cascara de papa cardenal

A = 293,757 gr de papa cardenal que ingresa al proceso.

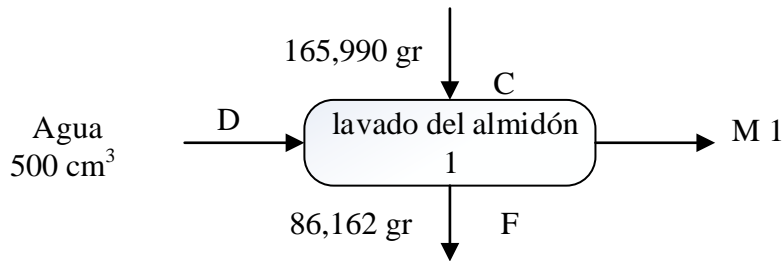


Balance en la extracción del almidón: $B = C + PE$

$$PE = 250 \text{ gr} - 165,990 \text{ gr}$$

PE = Masa de la pulpa (fibra) de papa cardenal

PE = 84,01 gr de pulpa (fibra)



M1 = Masa de agua de salida del lavado del almidón 1

Balance en el lavado del almidón 1: $C + D = F + M 1$

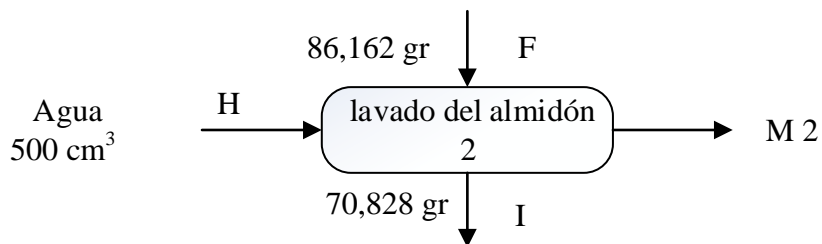
$$M 1 = 165,990 + 500 - 86,162$$

M1 = 579,826 gr masa de agua utilizado en el lavado del almidón 1.

Perdidas en el lavado = $M 1 - D$

Perdida en el lavado = $579,826 \text{ gr} - 500\text{gr} = 79,826 \text{ gr}$

Porcentaje de pérdida de masa = 47,54 %



M2 = Masa de agua de salida del lavado del almidón 2

Balance en el lavado del almidón 1: $F + H = I + M 2$

$$M 2 = 86,162 \text{ gr} + 500 \text{ gr} - 70,828 \text{ gr}$$

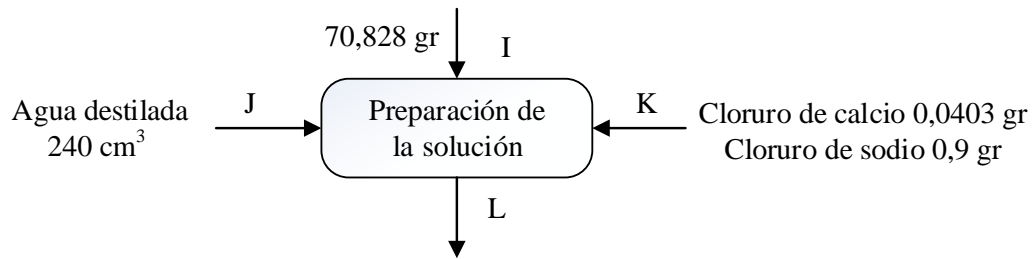
M2 = 515.334 gr masa de agua a la salida del proceso de la lavado del almidón 2.

Perdidas en el lavado = $M 2 - D$

Perdida en el lavado = $515.334 \text{ gr} - 500\text{gr} = 15.334 \text{ gr}$

Porcentaje de pérdida de masa = 17.796 %

Nota: El valor de la densidad del agua destilada es de $1\text{g}/\text{cm}^3$. Aplicando la ecuación $\delta = m / v$ la masa del agua = volumen del agua $m = v$ solo en el caso del agua.



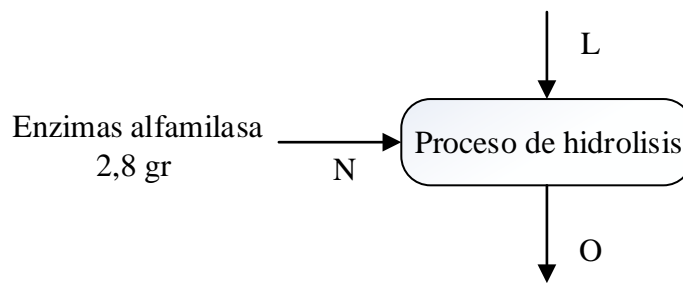
Balance en la preparación de la solución: $I + J + k = L$

I = masa del almidón húmedo

$I = 31,014 \text{ gr almidón seco} + 39,814 \text{ gr de agua} = 70,828 \text{ gr}$

$L = 240 \text{ gr} + 70,828 \text{ gr} + 0,9403 \text{ gr}$

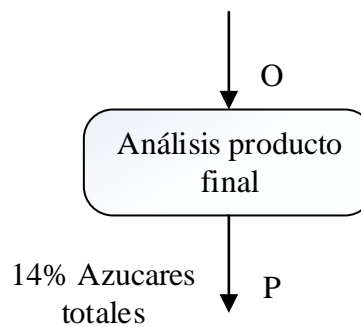
$L = 311,7683 \text{ gr de solución para la hidrólisis.}$



Balance en el proceso de hidrólisis: $L + N = O$

$311,7683 \text{ gr} + 2,8 \text{ gr} = O$

$O = 314,568 \text{ gr masa total para el proceso de hidrólisis del almidón de papa cardenal.}$



Balance final: O = P

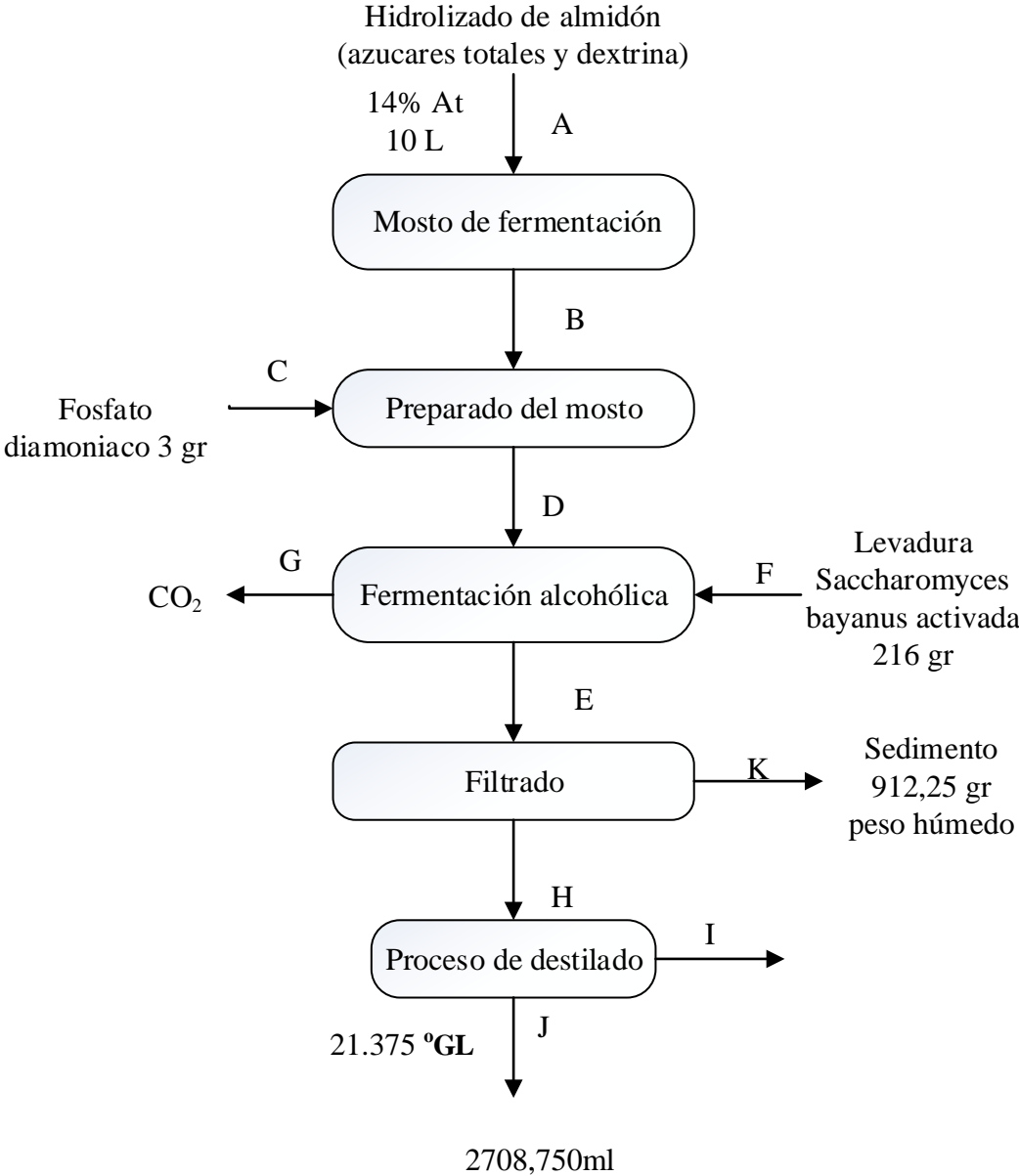
Producto obtenido en la hidrólisis $314,568 \text{ gr} * 0.14 = 44,039 \text{ gr}$ de azúcares totales.

El rendimiento del proceso de hidrólisis es del 100% o se hidrolizo los 31,014 gr de almidón ingresados al proceso.

ANEXO 6

**BALANCE DE MATERIA PROCESO DE
FERMENTACION ALCOHOLICA**

BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

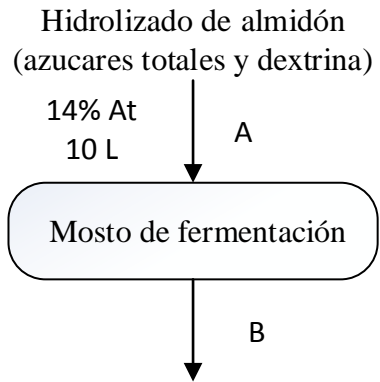


Fuente: Elaboración propia.

Balance global:

$$A + C + F = G + K + I + J$$

BALANCE DE MATERIA PARA CADA PROCESO



At = Azúcares totales.

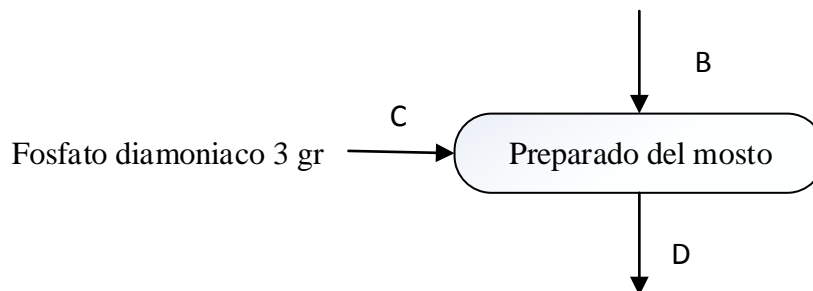
$\delta_M = 1,062$ gr/ml densidad del mosto.

A = Masa del mosto.

Balance en el mosto de fermentación: $A = B$

$$B = \delta_M * V_M = 1.062 \text{ gr/ml} * 10000 \text{ ml}$$

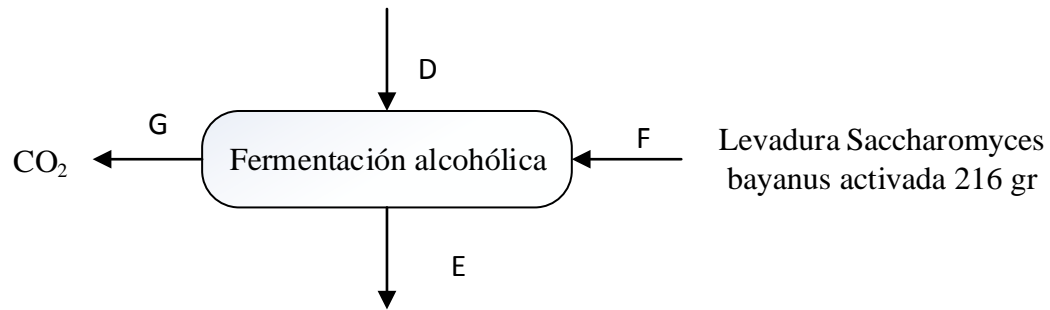
B = 10620 gr masa de mosto que ingresa al proceso.



Balance en la preparación del mosto: $D = C + B$

$$D = 3 \text{ gr} + 10620 \text{ gr}$$

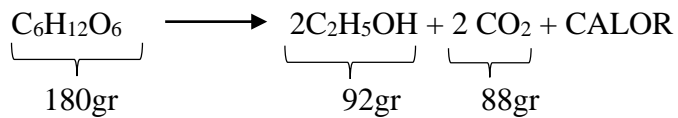
D = 10623 gr de materia que entra al reactor de fermentación.



Balance de materia en la fermentación alcohólica: $D + F = G + E$

$$E = 10623 \text{ gr} + 216 \text{ gr} - G$$

Para calcular la masa de CO_2 desprendido del proceso de fermentación se procedió a realizar un cálculo de estequiometria aplicando la ley de conservación de la masa un una reacción química.



$D = 10623\text{gr}$ de mosto

14 % Azúcares totales expresados en glucosa

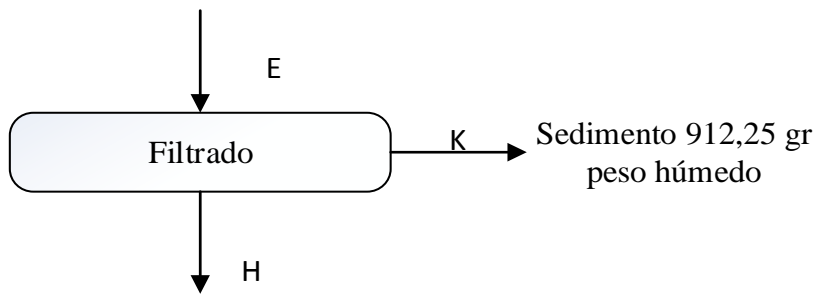
Masa de glucosa en el mosto $10623 \text{ gr} * 0,14\% = 1487,22 \text{ gr}$

$$G = 1487.22 \text{ gr } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} * \frac{88 \text{ gr } \text{CO}_2}{180 \text{ gr } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} =$$

$G = 727,085\text{gr}$ CO_2 masa de dióxido de carbono desprendido del proceso de fermentación

$$E = 10623 \text{ gr} + 216 \text{ gr} - 727,085\text{gr}$$

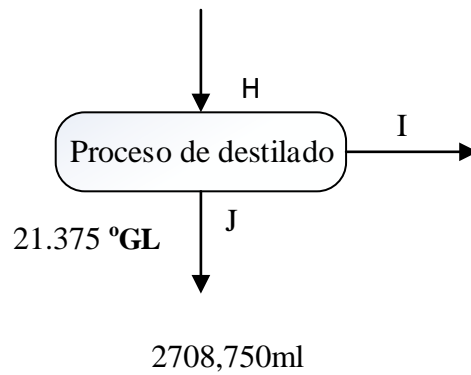
$E = 10111,915 \text{ gr}$ de fermentado alcohólico.



Balance de materia en el proceso de filtrado: $E = H - K$

$$H = 10111,915 \text{ gr} - 912,25$$

$H = 9199,665 \text{ gr}$ de masa filtrada.



$I =$ Producto de cabeza (cm^3)

$J =$ Producto de cola (cm^3)

Densidad aproximada 1 gr/cm^3 de la muestra filtrada.

$$H = I + J$$

$$I = 9199,665 \text{ cm}^3 - 2708,750 \text{ cm}^3$$

$I = 6490,915 \text{ cm}^3$ volumen del producto de cola.

CALCULO DEL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA.

I = 2708,750 cm³ producto de cabeza con un grado alcohólico de 21.375 °GL

La cantidad de etanol obtenido en el proceso es:

$$V_{\text{Alcohol}} = 2708,750 \text{ cm}^3 * 0.21.375$$

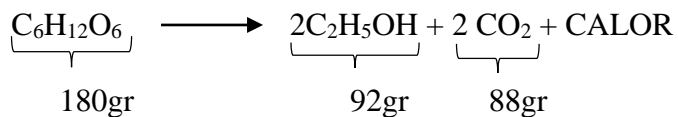
$$V_{\text{Alcohol}} = 578.995 \text{ cm}^3$$

Densidad del etanol = 0,8 gr de etanol / 1 cm³ de mezcla

$$M_{\text{alcohol real}} = 0.8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 578.995 \text{ cm}^3$$

$$M_{\text{alcohol real}} = 463.196 \text{ gr}$$

Reacción química.



D = 10623gr de mosto

14 % Azúcares totales expresados en glucosa

Masa de glucosa en el mosto 10623 gr * 14% = 1487.22 gr

$$M_{\text{alcohol teorico}} = 1487.22 \text{ gr } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} * \frac{92 \text{ gr } \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}{180 \text{ gr } \cancel{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} =$$

$$M_{\text{alcohol teórico}} = 760.134 \text{ gr}$$

$$\text{RENDIMIENTO \%} = \frac{\text{MASA SUSTANCIA REAL}}{\text{MASA SUSTANCIA TEORICO}} * 100$$

$$\text{RENDIMIENTO \%} = \frac{463.196 \text{ gr}}{760.134 \text{ gr}} * 100 = 60,936\%$$

ANEXO 8
FICHA TÉCNICA DE LA LEVADURA

ANEXO 7
FICHA TÉCNICA ENZIMAS

ANEXO 9
DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados para llevar a cabo el proyecto de investigación: Obtención de Bioetanol por Hidrólisis Enzimática del Almidón de Papa Cardenal se describen a continuación.

BALANZA ANALÍTICA ELECTRÓNICA

La balanza analítica gilbertini de laboratorio de operaciones unitarias determina el peso en gramos con una capacidad máxima de 510 gr y una capacidad mínima de 1 gr de precisión, exactitud: 0.01 gr y potencial de 220 W (Ojo: La precisión depende del alcance máximo).

Balanza Analítica Gilbertini



Fuente: Elaboración propia

EXTRACTOR DE JUGOS

Este extractor de jugos de Philips extrae jugo de frutas y verduras. Características técnicas de la extractora de jugo Philips: Alimentación eléctrica de 220 V y 110 V, Motor 100 W de potencia, Jarra graduada de 0,8 litro de capacidad, Frecuencia: 40-50 Hz y velocidad 1500 R.P.M Giro bidireccional.

Extractora de jugo Philips



Fuente: Elaboración propia

REFRIGERADORA PARA BAÑOS FRIGEDOR

Aparato destinado a enfriar líquidos en los baños termostáticos donde sea necesaria una temperatura inferior al ambiente

Características técnicas del equipo de enfriamiento J.P. Selecta: tensión: 220 V - 110 V, frecuencia: 40-50 Hz, potencial: 100 W, temperatura: desde -20 °C hasta +20 °C, y las dimensiones exteriores: 41 cm alto x 21 cm ancho x 34 cm fondo, peso: 14 kg.

Equipo de enfriamiento



Fuente: Elaboración propia

ROTA VAPOR

Se utiliza principalmente para separar por medio de evaporación a presión reducida y suave, el solvente que acompaña al soluto de interés o bien, para realizar destilaciones fraccionadas.

Características técnicas del rota vapor heidolph: tensión: 230V - 240V, frecuencia: 50-60 Hz, velocidad mínima: 150 R.P.M y velocidad máxima: 800 R.P.M, potencial: 1320 W, temperatura mínima 30°C y temperatura máxima: 160°C.

Rota vapor Heidolph



Fuente: Elaboración propia

AUTOCLAVE

La esterilización con vapor saturado es el método universal más utilizado, aplicable a todos aquellos artículos que pueden soportar el calor y la humedad. Indicado para esterilizar: medios de cultivo, vidrios, líquidos, plásticos, elementos metálicos, bolsas de desecho, etc.

Características técnicas del autoclave Raypa: tensión: 220V - 380V, Capacidad: 28 litros, Medidas interior: 300 mm Diámetro x 400 Alto mm, Medidas exterior: 1010 mm

Alto x 510 mm Ancho x 560 mm Fondo, Potencial: 2000 W, Peso: 60 kg, presión máxima 1.5 bares

Autoclave Raypa



Fuente: Elaboración propia

TERMOSTATO DE INMERSIÓN

Termostato de inmersión para temperaturas regulables desde ambiente +5°C hasta 100°C, equipado con una bomba para agitación y circulación, volumen máximo a temperatura límite de 20 litros, profundidad mínima de fijación a la cubeta de 14 cm, sensor de temperatura por termoresistencia Pt 100.

Termostato de Inmersión J.P. Selecta



Fuente: Elaboración propia

BOMBA DE VACÍO

Bomba de vacío está caracterizada por su velocidad de bombeo y la cantidad de gas evacuado por unidad de tiempo. Toda bomba de vacío tiene una presión mínima de entrada, que es la presión más baja que puede obtenerse, y también, un límite superior a la salida.

Características técnicas: Bomba de vacío modelo Telstar A 6611-04 tensión: 230V, frecuencia: 50 – 60 Hz rango de presión de vacío 0-100 kPa

Bomba de vacío Telstar



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 10
ECUACIONES ANÁLISIS
ESTADÍSTICO

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) permite comparar simultáneamente todas las medidas, la comparación de las medidas muestrales se basa en las varianzas muestrales.

Tratamiento: Es la fuente de datos cuya variación proporciona las observaciones.

Sean:

- k:** Número de tratamientos
- n:** Número total de observaciones en todos los tratamientos combinados
- n_j:** Número total de observaciones en cada tratamiento $j = 1, 2, \dots, k$
- x_{i,j}:** Es la i-esima observación del tratamiento j
- \bar{x}_j :** Media muestral del tratamiento j (incluye las observaciones de cada tratamiento)
- \bar{x} :** Media muestral general (incluye a todas las observaciones de todos los tratamientos)

Variación Total: Es la variación total combinada de las observaciones de todos los tratamientos con respecto a la media general.

$$\text{Media muestral del tratamiento } j: \bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{i,j}$$

$$\text{Variación de tratamientos: } \mathbf{SCTr} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (\text{Suma cuadrática de tratamientos})$$

Variación aleatoria o error: Es la variación dentro de cada tratamiento debido a errores en el experimento.

Variación aleatoria o error: **SCE = SCT – SCTr** (Suma cuadrática del error)

La ecuación **SCT = SCTr + SCE** separa la variación total en dos componentes: el primero corresponde a la variación atribuida a los tratamientos y el segundo es la variación atribuida a la aleatoriedad o errores del experimento.

SCTr tiene $k - 1$ grados de libertad (varianza ponderada con k tratamientos)

SCE tiene $n - k$ grados de libertad (existen n datos y k tratamientos)

SCT tiene $n - 1$ grados de libertad (suma de grados de libertad de SCTr y SCE)

Si cada uno se divide por el número de grados de libertad se obtienen los cuadrados medios

$$F_0 = \frac{\frac{SCTr}{k-1}}{\frac{SCE}{n-k}} =$$

- 1) Hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ (las medias poblacionales son iguales)
- 2) Hipótesis alterna: $H_a: \neg H_0$ (al menos dos medias son iguales)
- 3) Definir el nivel de significancia de la prueba α
- 4) Elegir el estadístico de prueba: Distribución F con $v_1 = k - 1$, $v_2 = n - k$ g. l. Definir la región de rechazo de H_0
- 5) Calcular F_0
- 6) Decidir

Tabla Anova (Análisis de Varianza)

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | F_0 |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|
| Tratamiento | $k - 1$ | SCTr | $SCTr/(k - 1)$ | $(SCTr/(k - 1))/(SCE/(n - k))$ |
| Error | $n - k$ | SCE | $SCE/(n - k)$ | |
| Total | $n - 1$ | SCT | | |

Fuente: Rodríguez, 2007

REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

En donde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los parámetros que deben estimarse para el modelo, mientras que ε es el componente aleatorio de Y .

MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k$$

En donde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los $k+1$ estimadores para los $k+1$ parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$. Para cada valor x_i se tiene el dato observado y_i , mientras que al evaluar el modelo de los mínimos cuadrados con este mismo valor x_i se obtiene el valor \bar{y}_i .

Sea $e_i = y_i - \bar{y}_i$, la diferencia de estos dos valores se denomina el residual

SUMA DE LOS CUADRADOS DEL ERROR

$$SCE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x_{1,i} - \widehat{\beta}_2 x_{2,i} - \dots - \widehat{\beta}_k x_{k,i})^2$$

SCE es una función con k+1 variables: $\widehat{\beta}_0, \widehat{\beta}_1, \dots, \widehat{\beta}_k$

Para minimizar SCE:

$$\frac{\partial SCE}{\partial \widehat{\beta}_1} = 0, I = 0, 1, 2, \dots, k$$

Resulta un sistema de k+1 ecuaciones lineales de donde se obtienen los k+1 estimadores $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$.

ANÁLISIS DE VARIANZA

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$
$$SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 \quad SCR = \sum_{i=1}^n (\widehat{y}_i - \bar{y})^2$$

Se obtiene la relación entre las fuentes de error del modelo de regresión múltiple

$$SCT = SCR + SCE$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\widehat{y}_i - \bar{y})^2$$

SCT: Suma de cuadrados total

SCR: Suma de cuadrados de regresión

SCE: Suma de cuadrados del error

COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN

El coeficiente de determinación es otra medida de la relación lineal entre las variables x y y. Es útil para interpretar la eficiencia de la recta de mínimos cuadrados para explicar la variación de la variable de respuesta (y)

Definición: Coeficiente de determinación

$$r^2 = \frac{SCR}{SCT}, \quad 0 \leq r^2 \leq 1$$

El valor de r^2 mide el poder de explicación del modelo de mínimos cuadrados. Si r^2 es cercano a 1 significa que la recta de mínimos cuadrados se ajusta muy bien a los datos.

Tabla Anova

| Fuente de variación | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | F_0 |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| Regresión | k | SCR | SCR/k | (SCR/k)/(SCE/(n-k-1)) |
| Error | n - k - 1 | SCE | SCE/(n - k - 1) | |
| Total | n - 1 | SCT | | |

Fuente: Rodríguez, 2007

PRUEBA DE DEPENDENCIA LINEAL DEL MODELO

$$F_0 = \frac{SCR/k}{SCE/(n-k-1)}$$

Puede demostrarse que tiene distribución F con $\nu_1 = k$, $\nu_2 = n - k - 1$ grados de libertad.

H^0 : $\beta_1 = \dots = \beta_k = 0$, No hay dependencia lineal de y con X_i

H_a : $\neg H_0$, la respuesta Y depende al menos una variable X_i

Si se especifica el nivel de significancia α de la prueba, entonces la región crítica es

Rechazar H_0 si $f_0 > f_\alpha$ con $\nu_1 = k$, $\nu_2 = n - k - 1$ grados de libertad.

ESTIMACIÓN DE LA VARIANZA

La varianza de los errores del modelo σ^2 es desconocida. Para poder hacer inferencias acerca de los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ es necesario un estimador.

$$s^2 = \frac{SCE}{n - k - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}$$

ESTADÍSTICOS PARA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Se establecen los datos estadísticos para realizar las inferencias

$$t = \frac{\widehat{\beta}_i - \beta_i}{\sqrt{\sigma_{\widehat{\beta}_i}^2}}, i=0,1,\dots,k$$

Tienen distribución t con v: n-k-1 grados libertad

INTERVALO DE CONFIANZA

Parámetro: β_i , $i = 0,1,\dots, k$

Estimador: $\widehat{\beta}_i$, $i = 0,1,\dots, k$

El estadístico

$$t = \frac{\widehat{\beta}_i - \beta_i}{\sqrt{\sigma_{\widehat{\beta}_i}^2}}, \text{ Tiene distribución t con } v = n-k-1 \text{ grados libertad.}$$

La desigualdad $-t_{\alpha/2} \leq t \leq t_{\alpha/2}$ tiene probabilidad $1-\alpha$ de donde se obtiene:

$$\widehat{\beta}_i - t_{\alpha/2} \sqrt{\sigma_{\widehat{\beta}_i}^2} \leq \beta_i \leq \widehat{\beta}_i + t_{\alpha/2} \sqrt{\sigma_{\widehat{\beta}_i}^2}, i=0,1,\dots,k$$

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Parámetro: β_i , $i = 0,1,\dots, k$

Estimador: $\widehat{\beta}_i$, $i = 0,1,\dots, k$

- 1) H_0 : $\beta_i = b_0$ (Algún valor especificado para el parámetro β_0)
- 2) H_a : $\beta_i < b_0$ o $\beta_i > b_0$ o $\beta_i \neq b_0$
- 3) α nivel de significancia de la prueba
- 4) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\widehat{\beta}_i - \beta_i}{\sqrt{\sigma_{\widehat{\beta}_i}^2}}, \text{ Tiene distribución t con } v = n-k-1 \text{ grados libertad.}$$

$i=0,1,\dots,k$

Si se especifica el nivel de significancia α se define la región de rechazo de

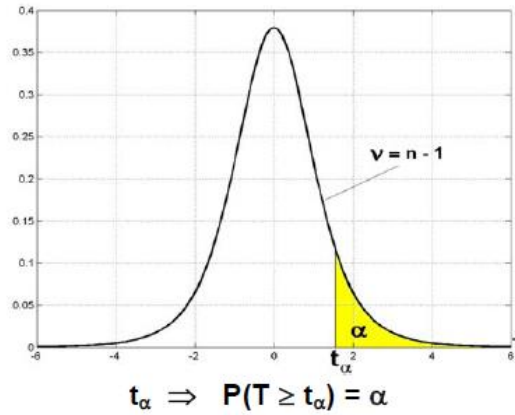
$$\text{Ha: } \beta_i < b_0 \quad t < -t_\alpha$$

$$\text{Ha: } \beta_i > b_0 \quad t > t_\alpha$$

$$\text{Ha: } \beta_i \neq b_0 \quad t < -t_{\alpha/2} \vee t > t_{\alpha/2}$$

Es importante probar la hipótesis $H_0: \beta_i = 0$ individualmente con cada parámetro β_i . En caso de que se pueda rechazar H_0 , se puede concluir que la variable contribuye significativamente a la respuesta; caso contrario, la variable es redundante y puede eliminarse del modelo.

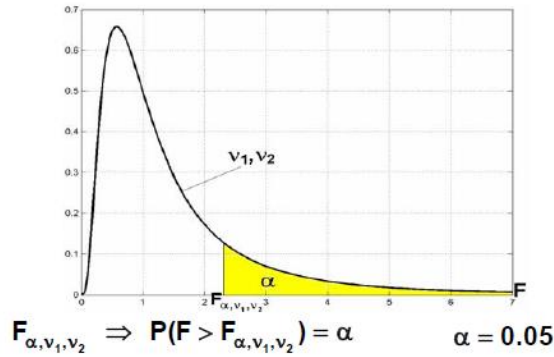
TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN T



| α | .40 | .25 | .10 | .05 | .025 | .01 | .005 | .0025 | .001 | .0005 |
|----------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| v | | | | | | | | | | |
| 1 | .325 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 127.320 | 318.310 | 636.620 |
| 2 | .289 | .816 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 | 14.089 | 23.326 | 31.598 |
| 3 | .277 | .765 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 | 7.453 | 10.213 | 12.924 |
| 4 | .271 | .741 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 | 5.598 | 7.173 | 8.610 |
| 5 | .267 | .727 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 | 4.773 | 5.893 | 6.869 |
| 6 | .265 | .718 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 | 4.317 | 5.208 | 5.959 |
| 7 | .263 | .711 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 | 4.029 | 4.785 | 5.408 |
| 8 | .262 | .706 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 | 3.833 | 4.501 | 5.041 |
| 9 | .261 | .703 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 | 3.690 | 4.297 | 4.781 |
| 10 | .260 | .700 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 | 3.581 | 4.144 | 4.587 |
| 11 | .260 | .697 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 | 3.497 | 4.025 | 4.437 |
| 12 | .259 | .695 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 | 3.428 | 3.930 | 4.318 |
| 13 | .259 | .694 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 | 3.372 | 3.852 | 4.221 |
| 14 | .258 | .692 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 | 3.326 | 3.787 | 4.140 |
| 15 | .258 | .691 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 | 3.286 | 3.733 | 4.073 |
| 16 | .258 | .690 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 | 3.252 | 3.686 | 4.015 |
| 17 | .257 | .689 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 | 3.222 | 3.646 | 3.965 |
| 18 | .257 | .688 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 | 3.197 | 3.610 | 3.922 |
| 19 | .257 | .688 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 | 3.174 | 3.579 | 3.883 |
| 20 | .257 | .687 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 | 3.153 | 3.552 | 3.850 |
| 21 | .257 | .686 | 1.323 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 | 3.135 | 3.527 | 3.819 |
| 22 | .256 | .686 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 | 3.119 | 3.505 | 3.792 |
| 23 | .256 | .685 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 | 3.104 | 3.485 | 3.767 |
| 24 | .256 | .685 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 | 3.091 | 3.467 | 3.745 |
| 25 | .256 | .684 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 | 3.078 | 3.450 | 3.725 |
| 26 | .256 | .684 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 | 3.067 | 3.435 | 3.707 |
| 27 | .256 | .684 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 | 3.057 | 3.421 | 3.690 |
| 28 | .256 | .683 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 | 3.047 | 3.408 | 3.674 |
| 29 | .256 | .683 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 | 3.038 | 3.396 | 3.659 |
| 30 | .256 | .683 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 | 3.030 | 3.385 | 3.646 |
| ∞ | .253 | .674 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 | 2.807 | 3.090 | 3.291 |

Fuente: Rodríguez, 2007

TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN F



| | | v_1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--|
| v_2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 24 | 30 | 40 | 60 | 120 | ∞ | |
| 1 | 161.4 | 199.5 | 215.7 | 224.6 | 230.2 | 234.0 | 236.8 | 238.9 | 240.5 | 241.9 | 243.9 | 245.9 | 248.0 | 249.1 | 250.1 | 251.1 | 252.2 | 253.3 | 254.3 | |
| 2 | 18.51 | 19.00 | 19.16 | 19.25 | 19.30 | 19.33 | 19.35 | 19.37 | 19.38 | 19.40 | 19.41 | 19.43 | 19.45 | 19.45 | 19.46 | 19.47 | 19.48 | 19.49 | 19.50 | |
| 3 | 10.13 | 9.55 | 9.28 | 9.12 | 9.01 | 8.94 | 8.89 | 8.85 | 8.81 | 8.79 | 8.74 | 8.70 | 8.66 | 8.64 | 8.62 | 8.59 | 8.57 | 8.55 | 8.53 | |
| 4 | 7.71 | 6.94 | 6.59 | 6.39 | 6.26 | 6.16 | 6.09 | 6.04 | 6.00 | 5.96 | 5.91 | 5.86 | 5.80 | 5.77 | 5.75 | 5.72 | 5.69 | 5.66 | 5.63 | |
| 5 | 6.61 | 5.79 | 5.41 | 5.19 | 5.05 | 4.95 | 4.88 | 4.82 | 4.77 | 4.74 | 4.68 | 4.62 | 4.56 | 4.53 | 4.50 | 4.46 | 4.43 | 4.40 | 4.36 | |
| 6 | 5.99 | 5.14 | 4.76 | 4.53 | 4.39 | 4.28 | 4.21 | 4.15 | 4.10 | 4.06 | 4.00 | 3.94 | 3.87 | 3.84 | 3.81 | 3.77 | 3.74 | 3.70 | 3.67 | |
| 7 | 5.59 | 4.74 | 4.35 | 4.12 | 3.97 | 3.87 | 3.79 | 3.73 | 3.68 | 3.64 | 3.57 | 3.51 | 3.44 | 3.41 | 3.38 | 3.34 | 3.30 | 3.27 | 3.23 | |
| 8 | 5.32 | 4.46 | 4.07 | 3.84 | 3.69 | 3.58 | 3.50 | 3.44 | 3.39 | 3.35 | 3.28 | 3.22 | 3.15 | 3.12 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.97 | 2.93 | |
| 9 | 5.12 | 4.26 | 3.86 | 3.63 | 3.48 | 3.37 | 3.29 | 3.23 | 3.18 | 3.14 | 3.07 | 3.01 | 2.94 | 2.90 | 2.86 | 2.83 | 2.79 | 2.75 | 2.71 | |
| 10 | 4.96 | 4.10 | 3.71 | 3.48 | 3.33 | 3.22 | 3.14 | 3.07 | 3.02 | 2.98 | 2.91 | 2.85 | 2.77 | 2.74 | 2.70 | 2.66 | 2.62 | 2.58 | 2.54 | |
| 11 | 4.84 | 3.98 | 3.59 | 3.36 | 3.20 | 3.09 | 3.01 | 2.95 | 2.90 | 2.85 | 2.79 | 2.72 | 2.65 | 2.61 | 2.57 | 2.53 | 2.49 | 2.45 | 2.40 | |
| 12 | 4.75 | 3.89 | 3.49 | 3.26 | 3.11 | 3.00 | 2.91 | 2.85 | 2.80 | 2.75 | 2.69 | 2.62 | 2.54 | 2.51 | 2.47 | 2.43 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | |
| 13 | 4.67 | 3.81 | 3.41 | 3.18 | 3.03 | 2.92 | 2.83 | 2.77 | 2.71 | 2.67 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.42 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | 2.25 | 2.21 | |
| 14 | 4.60 | 3.74 | 3.34 | 3.11 | 2.96 | 2.85 | 2.76 | 2.70 | 2.65 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.39 | 2.35 | 2.31 | 2.27 | 2.22 | 2.18 | 2.13 | |
| 15 | 4.54 | 3.68 | 3.29 | 3.06 | 2.90 | 2.79 | 2.71 | 2.64 | 2.59 | 2.54 | 2.48 | 2.40 | 2.33 | 2.29 | 2.25 | 2.20 | 2.16 | 2.11 | 2.07 | |
| 16 | 4.49 | 3.63 | 3.24 | 3.01 | 2.85 | 2.74 | 2.66 | 2.59 | 2.54 | 2.49 | 2.42 | 2.35 | 2.28 | 2.24 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.01 | |
| 17 | 4.45 | 3.59 | 3.20 | 2.96 | 2.81 | 2.70 | 2.61 | 2.55 | 2.49 | 2.45 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.19 | 2.15 | 2.10 | 2.06 | 2.01 | 1.96 | |
| 18 | 4.41 | 3.55 | 3.16 | 2.93 | 2.77 | 2.66 | 2.58 | 2.51 | 2.46 | 2.41 | 2.34 | 2.27 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.02 | 1.97 | 1.92 | |
| 19 | 4.38 | 3.52 | 3.13 | 2.90 | 2.74 | 2.63 | 2.54 | 2.48 | 2.42 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.16 | 2.11 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.93 | 1.88 | |
| 20 | 4.35 | 3.49 | 3.10 | 2.87 | 2.71 | 2.60 | 2.51 | 2.45 | 2.39 | 2.35 | 2.28 | 2.20 | 2.12 | 2.08 | 2.04 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.84 | |
| 21 | 4.32 | 3.47 | 3.07 | 2.84 | 2.68 | 2.57 | 2.49 | 2.42 | 2.37 | 2.32 | 2.25 | 2.18 | 2.10 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.81 | |
| 22 | 4.30 | 3.44 | 3.05 | 2.82 | 2.66 | 2.55 | 2.46 | 2.40 | 2.34 | 2.30 | 2.23 | 2.15 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.78 | |
| 23 | 4.28 | 3.42 | 3.03 | 2.80 | 2.64 | 2.53 | 2.44 | 2.37 | 2.32 | 2.27 | 2.20 | 2.13 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.91 | 1.86 | 1.81 | 1.76 | |
| 24 | 4.26 | 3.40 | 3.01 | 2.78 | 2.62 | 2.51 | 2.42 | 2.36 | 2.30 | 2.25 | 2.18 | 2.11 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.73 | |
| 25 | 4.24 | 3.39 | 2.99 | 2.76 | 2.60 | 2.49 | 2.40 | 2.34 | 2.28 | 2.24 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 | |
| 26 | 4.23 | 3.37 | 2.98 | 2.74 | 2.59 | 2.47 | 2.39 | 2.32 | 2.27 | 2.22 | 2.15 | 2.07 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.85 | 1.80 | 1.75 | 1.69 | |
| 27 | 4.21 | 3.35 | 2.96 | 2.73 | 2.57 | 2.46 | 2.37 | 2.31 | 2.25 | 2.20 | 2.13 | 2.06 | 1.97 | 1.93 | 1.88 | 1.84 | 1.79 | 1.73 | 1.67 | |
| 28 | 4.20 | 3.34 | 2.95 | 2.71 | 2.56 | 2.45 | 2.36 | 2.29 | 2.24 | 2.19 | 2.12 | 2.04 | 1.96 | 1.91 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 | 1.65 | |
| 29 | 4.18 | 3.33 | 2.93 | 2.70 | 2.55 | 2.43 | 2.35 | 2.28 | 2.22 | 2.18 | 2.10 | 2.03 | 1.94 | 1.90 | 1.85 | 1.81 | 1.75 | 1.70 | 1.64 | |
| 30 | 4.17 | 3.32 | 2.92 | 2.69 | 2.53 | 2.42 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.93 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.68 | 1.62 | |
| 40 | 4.08 | 3.23 | 2.84 | 2.61 | 2.45 | 2.34 | 2.25 | 2.18 | 2.12 | 2.08 | 2.00 | 1.92 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.69 | 1.64 | 1.58 | 1.51 | |
| 60 | 4.00 | 3.15 | 2.76 | 2.53 | 2.37 | 2.25 | 2.17 | 2.10 | 2.04 | 1.99 | 1.92 | 1.84 | 1.75 | 1.70 | 1.65 | 1.59 | 1.53 | 1.47 | 1.39 | |
| 120 | 3.92 | 3.07 | 2.68 | 2.45 | 2.29 | 2.17 | 2.09 | 2.02 | 1.96 | 1.91 | 1.83 | 1.75 | 1.66 | 1.61 | 1.55 | 1.55 | 1.43 | 1.35 | 1.25 | |
| ∞ | 3.84 | 3.00 | 2.60 | 2.37 | 2.21 | 2.10 | 2.01 | 1.94 | 1.88 | 1.83 | 1.75 | 1.67 | 1.57 | 1.52 | 1.46 | 1.39 | 1.32 | 1.22 | 1.00 | |

Fuente: Rodríguez, 2007

ANEXO 1

INFORMES DE ENSAYO DE

LABORATORIO

CURVA DE HIDROLISIS ENZIMÁTICA

ANEXO 2

INFORMES DE ENSAYO DE

LABORATORIO

DISEÑO FACTORIAL