

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y
TEXTIL**



**“TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE JARABE DE
GLUCOSA A PARTIR DE LA YUCA”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE :

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

RAUL GIANCARLO RODAS PUCA

2004

RESUMEN

En El Perú, la industrialización de la yuca es insipiente, hasta el año 1992 diversas aplicaciones se encontraban a nivel de investigación, mientras que a nivel industrial solo se tenía algunas como: panificación y hojuelas.

La producción nacional de yuca se destina solo en una pequeña porción (10%) a la elaboración de almidón, mientras el resto, un 90% aproximadamente, se destina directamente a la alimentación humana y animal.

En nuestro país no se han desarrollado estudios para la obtención de jarabe de glucosa a partir del almidón de yuca. Sin embargo, en países industrializados aproximadamente entre 8 y 28% de la producción de yuca es empleada para la obtención de almidón y jarabes de glucosa.

Teniendo el jarabe de glucosa (de baja, regular y alta conversión) aplicaciones alimenticias, farmacéuticas, en adhesivos y otros, se hace necesario comprender como se hidroliza el almidón para obtener el jarabe de glucosa.

El presente informe tiene como objetivo principal el dar a conocer las tecnologías de hidrólisis del almidón de yuca para obtener un producto de mayor valor agregado como el jarabe de glucosa. Asimismo, presentar la vía que genera mayores rendimientos y los parámetros necesarios para lograrlo.

INDICE

I.- INTRODUCCIÓN

II.- GENERALIDADES

2.1. YUCA

2.2. ALMIDÓN DE YUCA

2.2.1. Características del Almidón de Yuca

2.2.2. Contenido de Amilosa y Amilopectina

2.3. CARBOHIDRATOS

2.3.1. Glucosa

2.3.2. Jarabes de glucosa

2.3.3. Equivalente de dextrosa

2.4. HIDRÓLISIS

2.4.1. Hidrólisis Ácida

2.4.2. Hidrólisis Ácida-Enzimática

2.4.3. Hidrólisis Enzimática

III.- JARABE DE GLUCOSA A PARTIR DE ALMIDON DE YUCA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

3.1.1. Obtención de la Harina de Yuca

3.1.2. Obtención del Almidón de Yuca

3.1.2.1. El Proceso

3.1.2.2. Comparación de Tecnologías

3.1.2.3. Descripción del Proceso

3.1.3. HIDRÓLISIS DEL ALMIDÓN DE YUCA

3.1.3.1. Hidrólisis Enzimática

3.1.3.2. Hidrólisis Ácida-Enzimática

3.1.3.3. Hidrólisis Ácida

3.1.4. OBTENCIÓN DEL JARABE DE GLUCOSA

3.1.4.1 Clarificación

3.1.4.2. Decoloración

3.1.4.3. Filtración

3.1.4.4. Concentración

3.1.4.5. Producto Final

IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.- BIBLIOGRAFÍA

VI.- ANEXOS

I.- INTRODUCCIÓN

La yuca, en el país, alcanza en los últimos años niveles altos de producción; según el Ministerio de Agricultura para los años 2001– 2003 se obtuvo niveles del orden de 525 000 toneladas métricas por año.

Esta producción no es industrializada en su mayor parte, destinándose solo 10% de estos volúmenes a la elaboración de almidón, mientras el resto, un 90% aproximadamente, se destina a la alimentación humana y animal.

El Perú con grandes áreas de cultivo no empleadas o mal usadas, debe iniciar tal estudio; considerando además que grandes cantidades de yuca, se desperdician en las zonas de producción debido a problemas de transporte, es una necesidad dar uso no tradicional a dichos excedentes.

Precisamente, es propósito de este estudio, que la obtención de glucosa a partir de yuca, responda a tales necesidades y contribuya en algo para hacer posible su realización.

II.- GENERALIDADES

2.1- YUCA

A pesar de la importancia de este producto natural como fuente de alimentación e insumo para la industria, son pocos los trabajos de investigación que se han realizado para ampliar su uso.

Desde el punto de vista agronómico, la yuca presenta grandes ventajas, es una planta de alta resistencia a los insectos, no es exigente en calidad de suelo y requiere cuidados de cultivo mínimos.

La yuca, que rinde por área más calorías que ninguna otra planta, es rica en vitamina B, fósforo y hierro, su diferencia principal reside en el bajo contenido de proteína que no llega al 2% en base húmeda.

El cultivo de yuca además de ser usado como alimento humano se puede aplicar en el ámbito industrial para la obtención de alcohol, almidón, almidones modificados, jarabe de glucosa, dextrinas y en la alimentación animal.

La yuca se cultiva con mucha facilidad y puede dar una cantidad de almidón igual a tres veces lo que dan los cereales en una misma superficie de terreno; se puede probar para elevar el valor nutritivo; mezclando la harina de yuca, almidón y almidón modificado, con algunos productos ricos en proteínas, como quinua, harina de pescado, etc.; con lo que se podría sustituir la cantidad de cereales importados.

Actualmente, el Perú produce alrededor de 525 000 TM de yuca, las cuales se encuentran orientadas al consumo directo y a la producción de almidón de forma artesanal; se puede ver en la tabla 2.1, la producción nacional de este producto y en la tabla 2.2, la composición de la yuca.

Tabla 2.1: Producción Nacional de Yuca

AÑO	SUPERFICIE (Has.)	RENDIMIENTO (Kg/Ha)	PRODUCCIÓN (TM)
1974	37 350	12 464	468 917
1975	37 350	12 587	470 136
1976	35 853	11 226	402 486
1977	35 853	11 220	402 456
1978	37 800	12 620	462 380
1979	37 850	12 575	462 393
1980	37 680	13 380	464 200
1981	37 930	13 387	465 125
1982	37 980	13 370	495 130
1983	37 830	13 385	470 130
1984	37 920	13 375	464 200
1985	38 080	13 350	507 368
1986	38 560	13 345	514 583

FUENTE ← : Dirección de Información y Estadística – Anuario Estadístico 1974 – 1986. Ministerio de Agricultura.

Tabla 2. 2 : Composición Química de la Yuca Variedad Blanca

COMPONENTES	BASE HUMEDA (%)	BASE SECA (%)
Humedad	62	
Materia Seca	38	
Proteína	0.27	0.70
Grasa	0.16	0.42
Ceniza	1.05	2.76
Fibra	2.02	5.31
Carbohidratos	34.5	90.78
OTROS ANÁLISIS		
Azúcares reductores	0.695	
Azúcares Totales	1.305	
Almidón	32.50	
pH.	6.1	

FUENTE: Cheftel (1976)

2.2- ALMIDÓN DE YUCA

2.2.1- CARACTERÍSTICAS DEL ALMIDÓN DE YUCA

El almidón de yuca es variable en sus características físico-químicas ya que son afectadas por la variedad, clima, medio ambiente, grado de madurez y duración de almacenaje.

Figura 2.1 : Micrografía del Almidón de Yuca

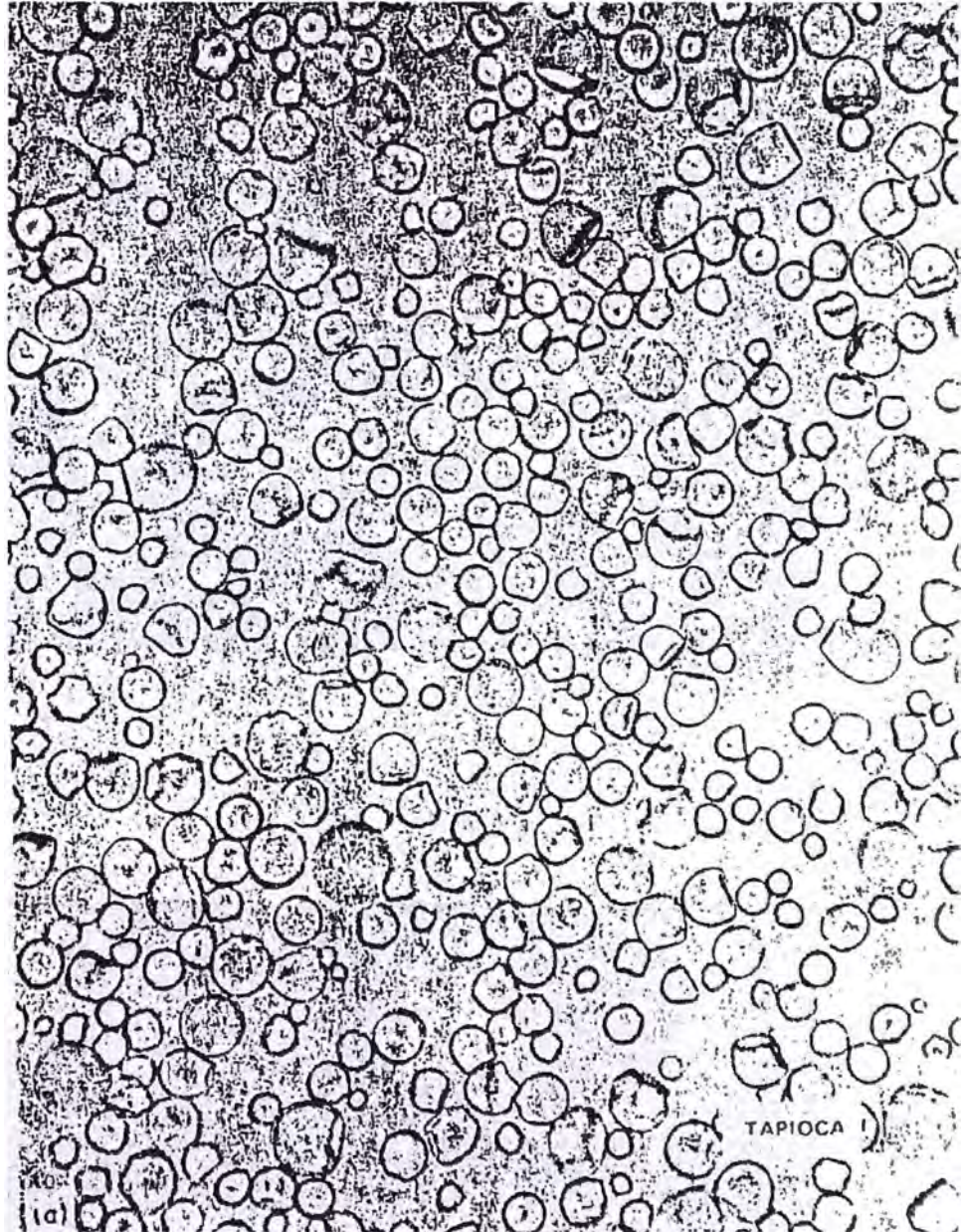
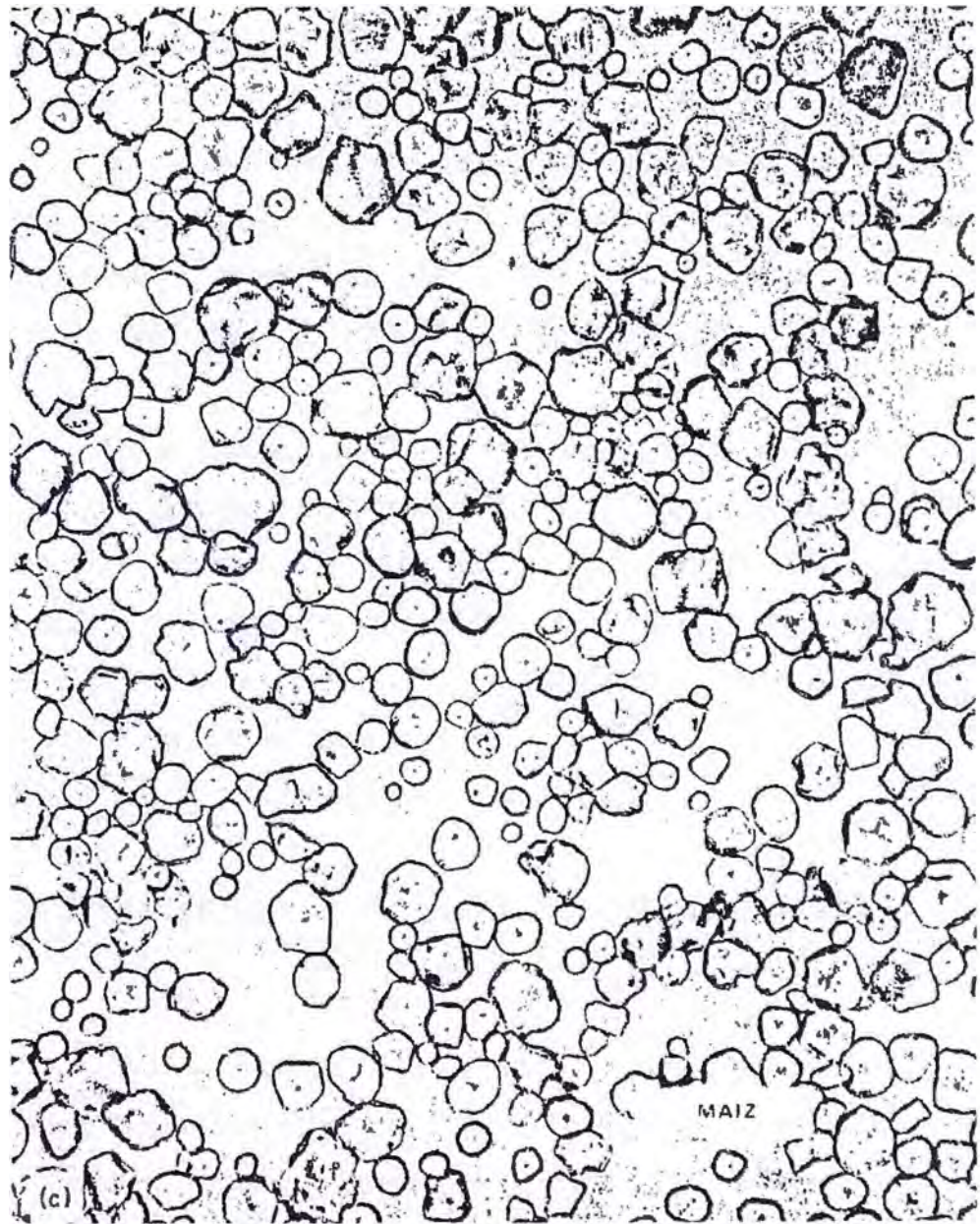


Figura 2.2: Micrografía del Almidón de Maíz



El tamaño promedio del granulo de almidón de yuca es similar al del almidón de camote, y también son similares a los de maíz pero menores a los de papa.

El tamaño de partícula, incluyendo la distribución de tamaño, es una de las características que afecta marcadamente las propiedades funcionales de los gránulos de almidón. Los granos más pequeños tienen tanto mayor solubilidad, como capacidad de absorción

En las figuras 2.1 y 2.2 se presentan las micrografías del almidón de yuca y de maíz, respectivamente; donde se observan que los gránulos de almidón de yuca son algo redondos y ovales con un borde dentado en una de sus partes poseen hilio central y con algunas fisuras; mientras que el almidón de papa son de forma ovalada en su mayoría, con estrías concéntricas muy acentuadas

2.2.2- CONTENIDO DE AMILOSA Y AMILOPECTINA

Desde un punto de vista químico, al almidón se le define como un glucano o mejor dicho una mezcla de glucanos, pues el granulo de almidón es un sistema heterogéneo que consiste principalmente en dos compuestos distintos: la amilosa, que es esencialmente un polímero lineal y la amilopectina, que es un polímero ramificado.

2.2.2.1- AMILOSA

La amilosa, producto de la condensación de hexosas (D-glucopiranosas) forma cadenas largas lineales que pueden tener 200 a

2500 unidades, con masas moleculares que llegan hasta un millón de Daltons. Los monosacáridos están unidos a través de enlaces glucosídicos α -(1,4), es decir; la amilosa es un α -D-(1,4)-glucano; siendo la α -maltosa la unidad respectiva de esta estructura química. Sin embargo se encuentran con cierta frecuencia “imperfecciones” tales como ramificaciones u otro tipo de uniones glucosídicas.

La unión glucosídica α -(1,4) es bastante flexible. La forma de las moléculas de amilosa en solución acuosa es principalmente la de espiral al azar, algunas partes de la cadena pueden consistir en segmentos helicoidales cortos, inestables y transitorios. Cada vuelta de la hélice esta formada por seis unidades de hexosa, y los segmentos pueden tener entre 4 y 20 vueltas.

2.2.2.2- AMILOPECTINA

El otro componente polisacárido del almidón es la amilopectina, una molécula arborescente, en donde la mayoría de la unidades de α -D-glucopiranosilo están unidas entre si por enlaces α -(1,4) como en la amilosa, pero hay enlaces α -(1,6) como ramificación, existiendo una rama en promedio por cada 25 a 27 unidades de D-glucopiranosilo.

Es extremadamente heterogénea la masa molecular y también lo es el grado de ramificación de la amilopectina. Las mejores valoraciones de masa molecular de la amilopectina fluctúan entre 10 a 200 millones de Dalton.

En la tabla 2.3 se presenta una composición del contenido de amilosa y amilopectina en almidones naturales.

Tabla 2.3 : Contenido de Amilosa y Amilopectina de Almidones Naturales

ALMIDONES	AMILOSA (%)	AMILOPECTINA (%)
Papa	23	77
Yuca	20	80
Trigo	20	80
Arroz	15 - 35	65 - 85
Maíz	25	75
Maíz Céreo	15	75
Plátano	17	83

FUENTE: Cheftel (1976).

En la tabla 2.4 se observa las propiedades físicas y químicas de los componentes lineales y ramificados del almidón.

Tabla 2.4: Propiedades Físicas y Químicas de los componentes lineales y ramificados

PROPIEDADES	AMILOSA Comp. lineal	AMILOPECTINA Comp. Ramificado
Masa Molecular	10 000 – 60 000	30 000 – 1 000 000
Proporción en almidón	10 - 20	80 – 90
Acción de la α -amilasa	Hidrolizada por enzima al 100%	Hidrolizada por enzima al 60%
Comportamiento en el Agua	Fase sólida y líquida separada	Formas pastosas
Reacción con el Iodo	Color Azul	Color Rojo Violeta

FUENTE: Cheftel (1976)

2.3- CARBOHIDRATOS

2.3.1- GLUCOSA

La glucosa forma parte de la molécula de almidón, celulosa, hemicelulosa, dextrina, sacarosa, maltosa, rafinosa y muchos glucósidos. Por hidrólisis de estos materiales con enzimas específicas se libera glucosa.

La dextrosa nombre vulgar de la glucosa, es un azúcar reductor por tener un grupo aldehído potencialmente libre en el $C_{(1)}$. Si el oxígeno del $C_{(1)}$ se enlaza con otra molécula, como en el enlace α -(1,4) o α -(1,6), entonces el glucosil de la glucosa ya no es reductor. En el almidón, solamente hay un grupo reductor en cada molécula de almidón, todas las demás moléculas de glucosa están enlazadas en la

posición C(1). Por lo tanto con cada hidrólisis de un enlace α -(1,4) o α -(1,6), se libera un grupo reductor en una molécula de glucosa. La hidrólisis completa produce glucosa.

En la figuras 2.3 se muestra la estructura de la glucosa y del almidón; y en la figura 2.4 se muestra la estructura de la amilosa y la amilopectina

2.3.2- JARABES DE GLUCOSA

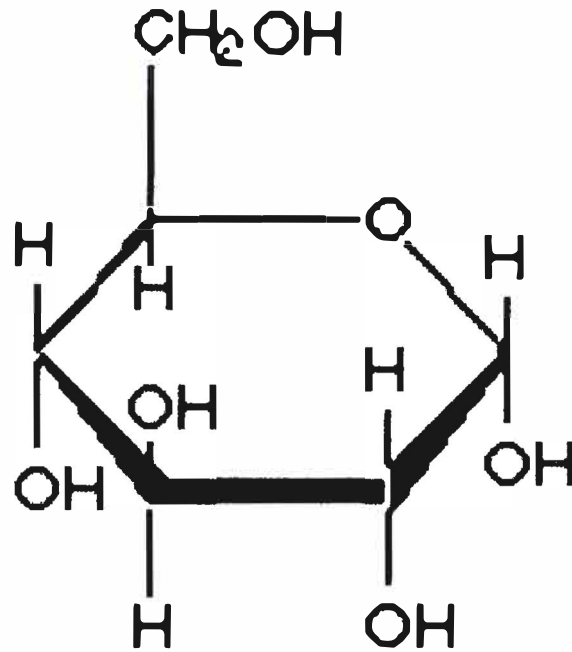
El jarabe de glucosa es una solución acuosa concentrada y purificada de sacáridos nutritivos obtenidos del almidón.

La dulzura de los jarabes de glucosa es dependiente de la cantidad de sacáridos de bajo peso molecular (principalmente la D-glucosa y maltosa) presentes, la concentración de sólidos, la temperatura en la cual el producto es utilizado y otras sustancias, tales como sales resultantes del proceso, las cuales pueden estar presentes. La dulzura se incrementa con la elevación de la concentración de sólidos.

Existen dos aplicaciones principales para los hidrolizados de alta conversión. Uno como fuente de D-glucosa para la producción de jarabe de alta fructosa y el segundo como una fuente de dextrosa cristalina. En ambas aplicaciones, esto es económico y funcionalmente ventajoso para proveer el contenido de sustancia seca mas alta y el mas alto grado de conversión de D-glucosa sin la formación de impurezas tales como ácidos orgánicos, cenizas o productos coloreados

Figura 2.3: Estructura de la Glucosa y del Almidón

Glucosa



α - Glucosa

Almidón

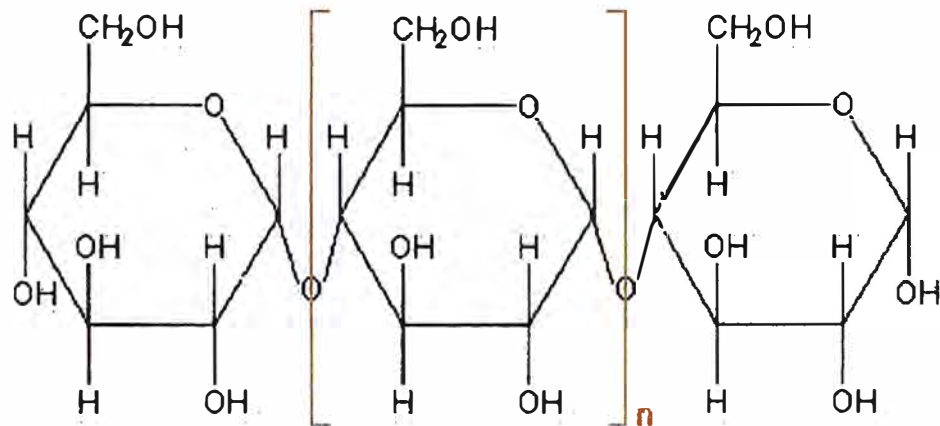
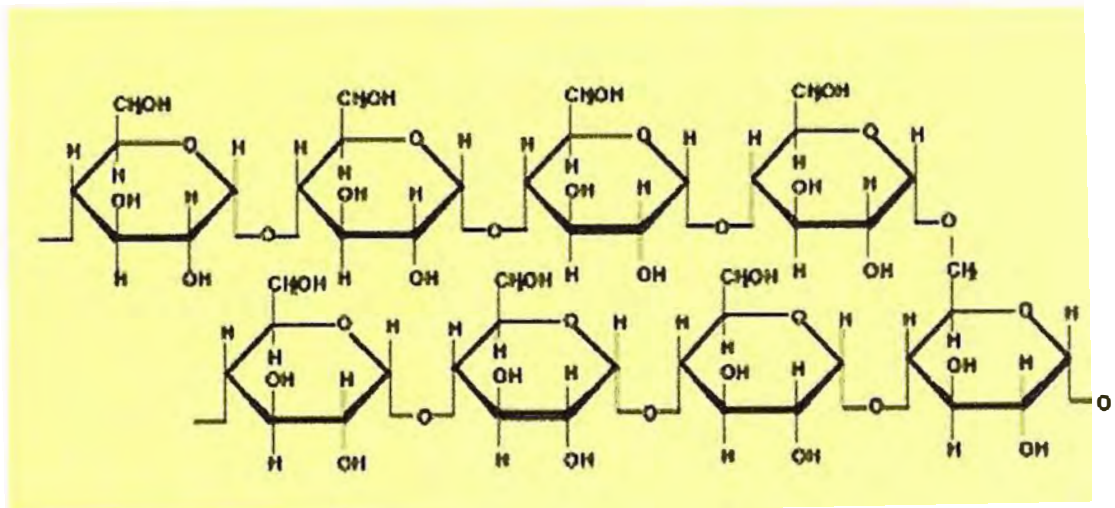
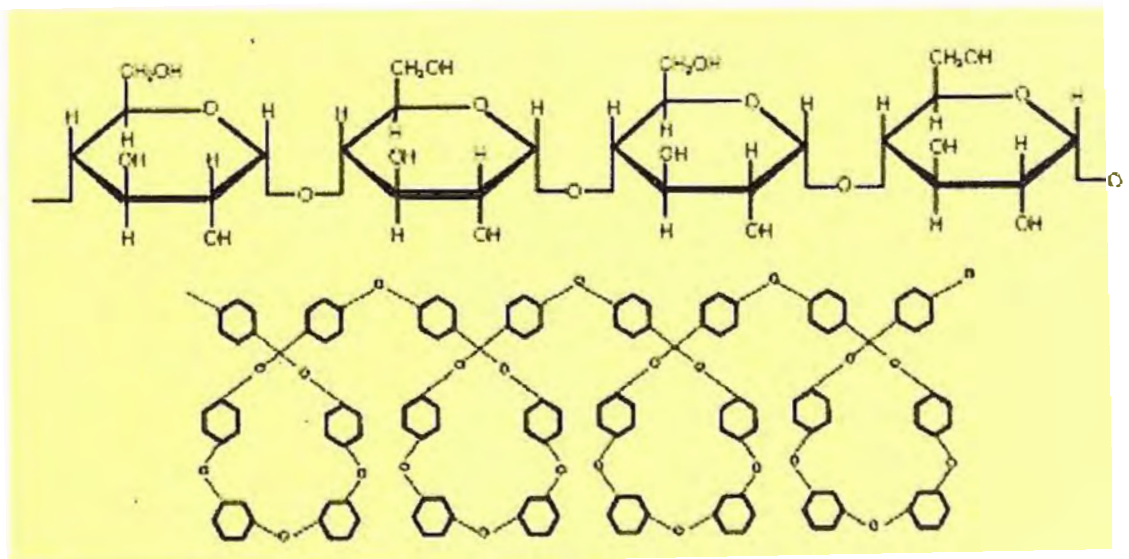


Figura 2.4: Estructura de la Amilopectina y Amilosa

Amilopectina



Amilosa



El jarabe de conversión regular es un producto que no se cristaliza, tiene un sabor ligeramente dulce y suave. Es particularmente útil porque evita o controla la cristalización de azúcar en dulces y helados, retiene la humedad, aumenta los sabores, contribuye a dar cuerpo o aumentar la viscosidad, y proporciona calorías en forma de carbohidratos. Además de sus aplicaciones alimenticias el jarabe de glucosa tiene varios usos industriales siendo los más importantes adhesivos, curtiembre, plateado de metales y tabaco.

Los jarabes de conversión ácida de 36 y 42 de ED (dextrosa equivalente) son productos apreciados en forma seca. Estos son preparados secando el licor del jarabe de glucosa refinado en atomizador o secadores de tambor al vacío hasta contenidos de humedad aproximados de 2,5%.

2.3.3- EQUIVALENTE DE DEXTROSA

El equivalente de dextrosa (ED), se define por la cantidad de azúcares reductores expresados en dextrosa y calculados en porcentaje en masa de materia seca.

2.4- ENZIMAS

2.4.1- α - AMILASA

Esta enzima hidroliza los enlaces glucosídicos α -(1,4) de los polisacáridos que poseen tres o más unidades de D-glucosa en unión α -(1,4). El ataque se hace al azar tipo (endo-enzima) sobre varios puntos de la cadena simultáneamente, aunque los primeros productos de la hidrólisis son siempre oligosacáridos de 5-7 unidades de glucosa o un número múltiplo, lo cual representa un ataque preferentemente sobre cada paso de hélice o múltiplo de la cadena espiral de la amilosa o de la amilopectina.

En el proceso al azar las moléculas de enzima muestran una preferencia igual por todos los enlaces α -(1,4) excepto aquellos adyacentes al penúltimo terminal de la cadena del sustrato y aquellos a la vecindad de los puntos de ramificación.

En las α -amilasas el modo de acción, propiedades y productos de degradación difieren algo dependiendo del origen de la enzima.

Las α -amilasas son probablemente las amilasas más ampliamente distribuidas; ellas son producidas por diferentes tipos de bacterias, hongos, animales y algunas plantas.

2.4.1.1. ACCION DE LA α -AMILASA

La acción de la α -amilasa en la fracción de amilosa del almidón sucede en dos etapas. Inicialmente toma lugar una completa y rápida degradación de amilosa en maltosa y maltotriosa. Este paso llamado de

α -amilolisis es esencialmente resultado de un ataque al azar en el sustrato por la enzima. La segunda etapa es mucho mas lenta que el primer paso, produciendo una lenta hidrólisis de oligosacáridos, con la formación de glucosa y maltosa como productos finales. La segunda etapa no es semejante al modelo de acción al azar.

Cuando se somete la amilosa a la acción de la α -amilasa; la mayor parte de ella se transforma en glucosa y maltosa, y solo una pequeña porción queda como una mezcla de polisacáridos de cadena corta que no sufren una ulterior hidrólisis. Esta mezcla recibe el nombre de dextrina límite de la α -amilasa. La incapacidad de la α -amilasa para hidrolizar este tipo de dextrina límite se explica por la presencia de “barreras” a la α -amilolisis en la amilosa, tales como las ramificaciones, residuos de hexosas oxidasas o uniones que no sean α -(1,4).

La α -amilolisis de amilopectina rinde glucosa, maltosa y una serie de α -dextrinas límites, oligosacáridos de cuatro o mas residuos de glucosa; todos conteniendo cadenas α -D-(1,6)-glucosídico. Una hidrólisis adicional de los productos resultantes de la primera etapa de enzimolisis se produce lentamente, efectuando el derrumbamiento de ciertos enlaces en las regiones de los puntos de ramificación de la molécula.

2.4.1.2. ACTIVIDAD DE LA ENZIMA

La masa molecular de las α -amilasas ha sido determinado en el orden de 50 000, cada molécula contiene un átomo-gramo de iones Ca^{2+}

El calcio no participa directamente en la formación del complejo enzima-sustrato, pero mantiene la molécula de enzima en la conformación óptima para la máxima actividad y estabilidad. Las trazas de iones Ca^{2+} que contiene el almidón son suficientes para saturar con este ion a la enzima privada de él. De todas maneras la adición de Ca^{2+} es útil para asegurar una estabilidad máxima de la enzima frente a la desnaturalización por calor.

2.4.1.5. α -AMILASA de *B.subtilis* y *B. Licheniformis*

La α -amilasa de *B. Subtilis* puede ser utilizada en el rango de temperatura entre a 85-90°C en suspensión de almidón, mientras que la amilasa del *B. Licheniformis* puede ser usada en una suspensión de almidón entre 110-115°C. El pH óptimo para la enzima de *B. Licheniformis* es 6,0 a temperatura baja y cerca de 7,0 a temperatura elevada; la temperatura máxima recomendada para su uso es 115°C, a 120°C esta es rápidamente inactivada, el uso de esta enzima a tal temperatura permite la gelatinización y licuefacción simultánea con niveles moderados de enzima.

La α -amilasa de *B. Subtilis* es dependiente del calcio en mayor proporción que la de *B. licheniformis*. Los requerimientos de iones de calcio para la completa estabilización de la enzima de *B. Licheniformis* esta en el orden de 5 ppm a 70°C y pH 5,7 para una solución de 0,1% del preparado comercial de enzima, mientras que el nivel mínimo de calcio para la enzima de *B. Subtilis* bajo iguales condiciones es alrededor de 150 ppm. El requerimiento mínimo de calcio de la enzima de *B. Licheniformis* es considerado importante

debido a que los niveles elevados de calcio tienden a ser inhibidores de glucosa isomerasa en el preparado del jarabe de fructosa.

2.4.2. β -AMILASA

La β -amilasa es una exohidrolasa específica para la penúltima unión α -(1,4) del extremo no reductor de la cadena, la ruptura de cadenas glucosídicas toma lugar en forma planeada, tipo exo-enzima. La β -amilasa hidroliza los enlaces α -(1,4)-glucosídico del almidón y glucogeno con una inversión de la configuración alrededor de la posición del C(1) de la glucosa de α a β . La β -amilasa es incapaz de romper las cadenas α -(1,6)-glucosídico de la amilopectina y desviar tales enlaces; así la degradación de amilopectina por la enzima es incompleta.

A la β -amilasa se le conoce con el nombre de enzima sacarogénica, pues actúa sobre la amilosa, rompiendo unidades α -(1,4) dando maltosa.

La β -amilasa se halla casi exclusivamente en los vegetales. Las mejores fuentes para su aislamiento son la papa y los granos de cebada germinados; también se halla en cereales, soya, camote y en gran cantidad en el trigo.

2.4.2.1. ACCION DE LA β -AMILASA

Desde que la enzima hidroliza alternativamente cadenas glucosídicas, el producto de la β -amilolisis de la amilosa es maltosa,

cuando la enzima actúa sobre una cadena lineal con un número par de residuos de glucosa; si es que actúa en una cadena consistente de un número impar de residuos, algunas glucosas y maltotriosas son encontradas entre los productos finales. La ruptura de maltotriosa, origina maltosa y glucosa, la cual ocurre lentamente comparado con la β -amilolisis inicial, y requiere de la presencia de una alta concentración de enzima.

En el caso de la amilopectina, la β -amilasa actúa en las uniones α -(1,4) de la cadena lineal y detiene su acción a distancia de 2 unidades de glucosa antes de la unión α -(1,6). Resulta así que la β -amilasa hidroliza solo las cadenas externas de la amilopectina, dejando intacto un gran núcleo de la molécula de polisacárido, delimitado por los puntos de ramificación. Este residuo recibe el nombre de dextrina límite de la amilosa para la amilopectina.

2.4.2.2. ACTIVIDAD DE LA ENZIMA

El rango de pH para la máxima actividad de la β -amilasa esta entre pH 5,0 y 6,0, y son completamente estables entre pH 4,0 y 9,0 a 20°C por un mínimo de 24 horas; las características de estabilidad al calor de la β -amilasa dependen del origen. Fuera de este rango de pH, y especialmente en el lado ácido, la β -amilasa del grano de soya es más estable que la correspondiente enzima de malta de trigo y malta de cebada.

La β -amilasa es más resistente a los ácidos que la α -amilasa, pero más sensible a la temperatura.

Todas las β -amilasas son fuertemente inhibidas por las sustancias que reaccionan con el grupo sulfidrilo (por ejemplo iones Cu^{2+} , Hg^{2+}), lo que significa que en el centro activo de la enzima debe haber grupos sulfidrilo que participan en la acción catalítica.

2.4.3. GLUCOAMILASA

Otra amilasa y de acción exo es la glucoamilasa, llamada también amiloglicosidasa y γ -amilasa la cual libera β -D-glucopiranososa a partir del final no reductor de la cadena de almidón. La glucoamilasa causa inversión de la configuración, rindiendo β -glucosa.

Al igual que la β -amilasa, se trata de una exohidrolasa, pero ataca la última unión glucosídica en el extremo no reductor de la cadena, liberando glucosa. Por tanto, las glucoamilasas son capaces de desramificar dextrinas límites, pueden hidrolizar pequeños glucanos y aun la maltosa.

Las principales fuentes para la obtención de glucoamilasa son los mohos *A. Oryzae* y *A. Niger*.

2.4.3.1 ACCION DE LA GLUCOAMILASA

Aunque la acción de la enzima no es obstruido por los enlaces α -(1,6)-glucosídicos en las cadenas moleculares, no se realiza una completa degradación. Es posible que alguno de los enlaces α -(1,6) que están presentes en los arreglos sean difíciles de hidrolizar por esta enzima.

La velocidad de hidrólisis del enlace α -(1,6) es aproximadamente 3-5% de la velocidad de hidrólisis del enlace α -(1,4), mientras que la velocidad de hidrólisis del enlace α -(1,3) es cerca de 5-10% que la del enlace α -(1,4).

2.4.3.2. ACTIVIDAD DE LA ENZIMA

La enzima tiene actividad óptima en el rango de pH 4.0-5.0 y exhibe un rango de temperatura óptimo de 50-60°C para tiempos por encima de 24 horas.

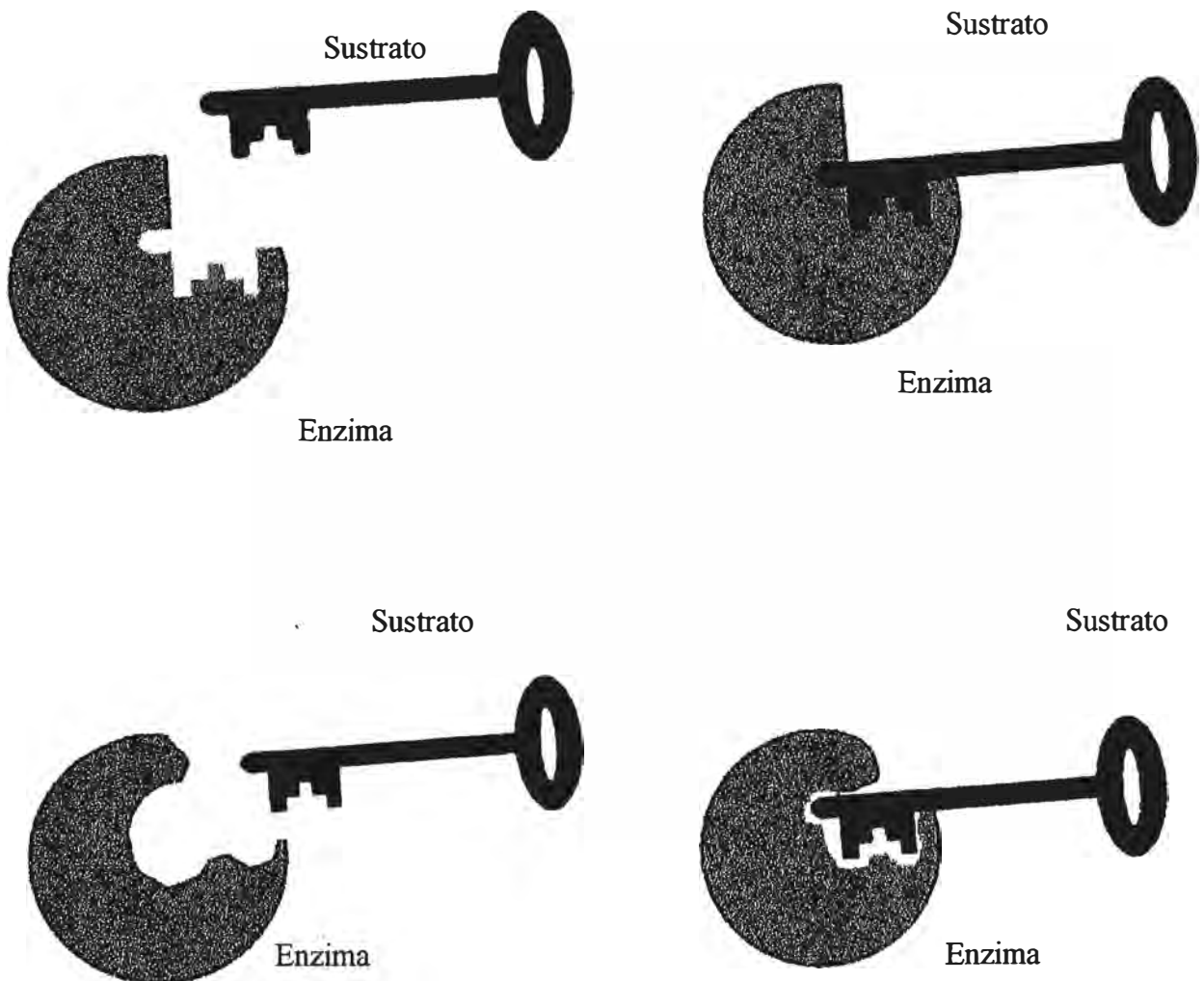
2.5- ENZIMAS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

2.5.1- NATURALEZA QUÍMICA DE LAS ENZIMAS

La actividad particular de las enzimas siempre ha despertado curiosidad y admiración. Se ha asumido que las enzimas no participan dentro de las reacciones químicas con las sustancias en las cuales actúan. Numerosas analogías han sido usadas con el propósito de explicar la acción de las enzimas o al menos ilustrarla. Una de esas es la analogía de la cerradura y la llave. La reacción química ha sido comparada con la apertura de una puerta cerrada con llave. En la ausencia de una llave (enzima) se requiere una gran fuerza para romper la puerta y abrirla. Con la llave apropiada la puerta puede ser abierta sin esfuerzo. Solo la llave particular (enzima) abrirá la cerradura. Las llaves son específicas para ciertas cerraduras y las enzimas son específicas para ciertas reacciones químicas. Las enzimas son específicas para determinados sustratos.

En la figura 2.5 se esquematiza la analogía de la cerradura-llave que se describe líneas arriba.

Figura 2.5: Esquema Cerradura Llave



2.5.2- FACTORES QUE INFLUENCIAN LA ESTABILIDAD DE LAS ENZIMAS

2.5.2.1- Efecto del pH

Todas las enzimas son sensibles a las variaciones de las concentraciones de H^+ en el medio. Existe una zona de pH para la cual la actividad enzimática es máxima. Esta zona de pH es la resultante de diversos parámetros: temperatura, fuerza iónica, concentración del sustrato, que son parámetros externos, pero también de la naturaleza de la enzima.

El pH puede afectar de varias maneras:

El centro activo puede contener aminoácidos con grupos ionizados que pueden variar con el pH.

La ionización de aminoácidos que no estén en el centro activo puede provocar modificaciones en la conformación de la enzima.

El sustrato puede verse afectado por las variaciones de pH.

Algunas enzimas presentan variaciones peculiares, por ejemplo, la Pepsina del estómago presenta un pH óptimo igual a 2, y la Fosfatasa alcalina del intestino un pH igual a 12.

2.5.2.2- Efecto de la Temperatura

Las enzimas son sensibles al calor, y a la desnaturalización por el calor de la proteína de la enzima da como resultado una pérdida gradual de sus propiedades catalíticas. Esto es usualmente llamado inactivación por el calor. La energía de activación para el proceso de

inactivación por el calor de la enzima es bastante alto. En consecuencia, la velocidad de inactivación se incrementa rápidamente con el incremento de la temperatura.

Como para el pH, existe una zona de temperatura, algunas veces muy pequeña, para la cual es máxima la actividad enzimática. Esta variación de la actividad enzimática en función de la temperatura esta determinada por la magnitud, en condiciones de operación bien determinadas (concentración del substrato y de la enzima, pH, fuerza ionica), de las variaciones de la velocidad inicial en función de la temperatura del medio.

La temperatura influye en la actividad. El punto optimo representa el máximo de actividad. A temperaturas bajas, las enzimas se hallan “muy rígidas” y cuando se supera un valor considerable (mayor de 50°C) la actividad cae bruscamente porque, como proteína, la enzima se desnaturaliza.

2.5.2.3. Efecto del Contenido de Agua

La velocidad de las reacciones enzimáticas están fuertemente influenciadas por la naturaleza y concentración de los solventes. En la práctica el efecto de la cantidad de agua en un alimento influye en la velocidad de la acción enzimatica.

2.6- HIDRÓLISIS

Los almidones son convertidos con facilidad en azúcares reductores por hidrólisis, ya sea por calentamiento con ácido o por reacción con enzimas.

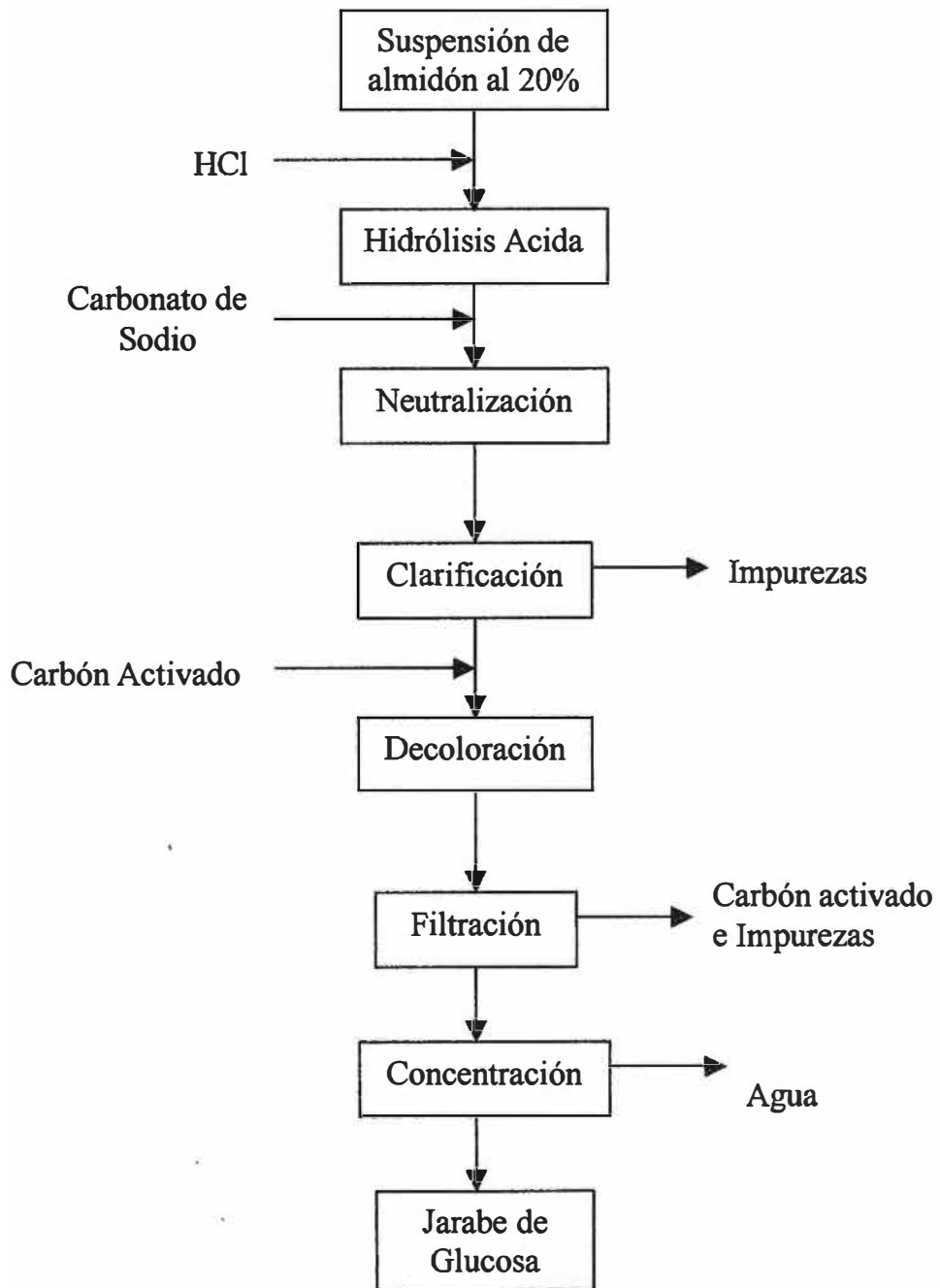
2.6.1- HIDRÓLISIS ACIDA

El primer método utilizado para la hidrólisis del almidón fue la hidrólisis ácida. Una suspensión de 15-25% de almidón en agua se coloca en una autoclave y se añade suficiente ácido clorhídrico para dar una concentración de 0,03-0,04N. El almidón en suspensión acuosa (30-40%) es tratado con ácido clorhídrico (aprox. 0.12%); La mezcla se calienta a 140-160°C durante 15-20 minutos o hasta que se alcanza el ED deseado. Al terminar el proceso de hidrólisis se suspende el calentamiento y la mezcla se neutraliza con carbonato de sodio, ajustando el pH entre 4,5 a 5,0. El jarabe de glucosa purificado se obtiene entonces por centrifugación, filtración y concentración.

La hidrólisis del almidón catalizada por oxidación de algún ácido fuerte es común para producir azúcares fermentables. La velocidad de hidrólisis depende de la naturaleza del ácido empleado, temperatura de incubación y la cantidad de ácido. Sin embargo, la hidrólisis ácida no es comúnmente recomendada porque esta da una degradación parcial del azúcar por el ácido, produciendo compuestos que no son fermentables, y que pueden inhibir el crecimiento microbiano durante un proceso de fermentación.

En la figura 2.6, el diagrama de flujo muestra las etapas para la obtención de jarabe de glucosa mediante hidrólisis ácida.

Figura 2.6: Diagrama de Flujo para la Obtención del Jarabe de Glucosa a partir del Almidón de Yuca mediante Hidrólisis Ácida



Durante la hidrólisis ácida a unos 40 equivalentes de dextrosa (ED), empiezan a producirse importantes reacciones secundarias y se obtienen jarabes oscuros; y a partir de valores de ED superiores a 55 aparecen sabores desagradables, se forma algo de furfural que provoca pardeamiento y sabores de caramelización, además, el grado de hidrólisis resulta de difícil control, especialmente cerca del final del proceso. Para minimizar la formación de color indeseable y permitir un mejor control del ED en el producto de conversión, se recomienda el uso de procesos continuos. Las desventajas del tratamiento ácido son generalmente bajos rendimientos en glucosa, elevados costos de purificación, riesgos de deterioro y corrosión del sistema empleado.

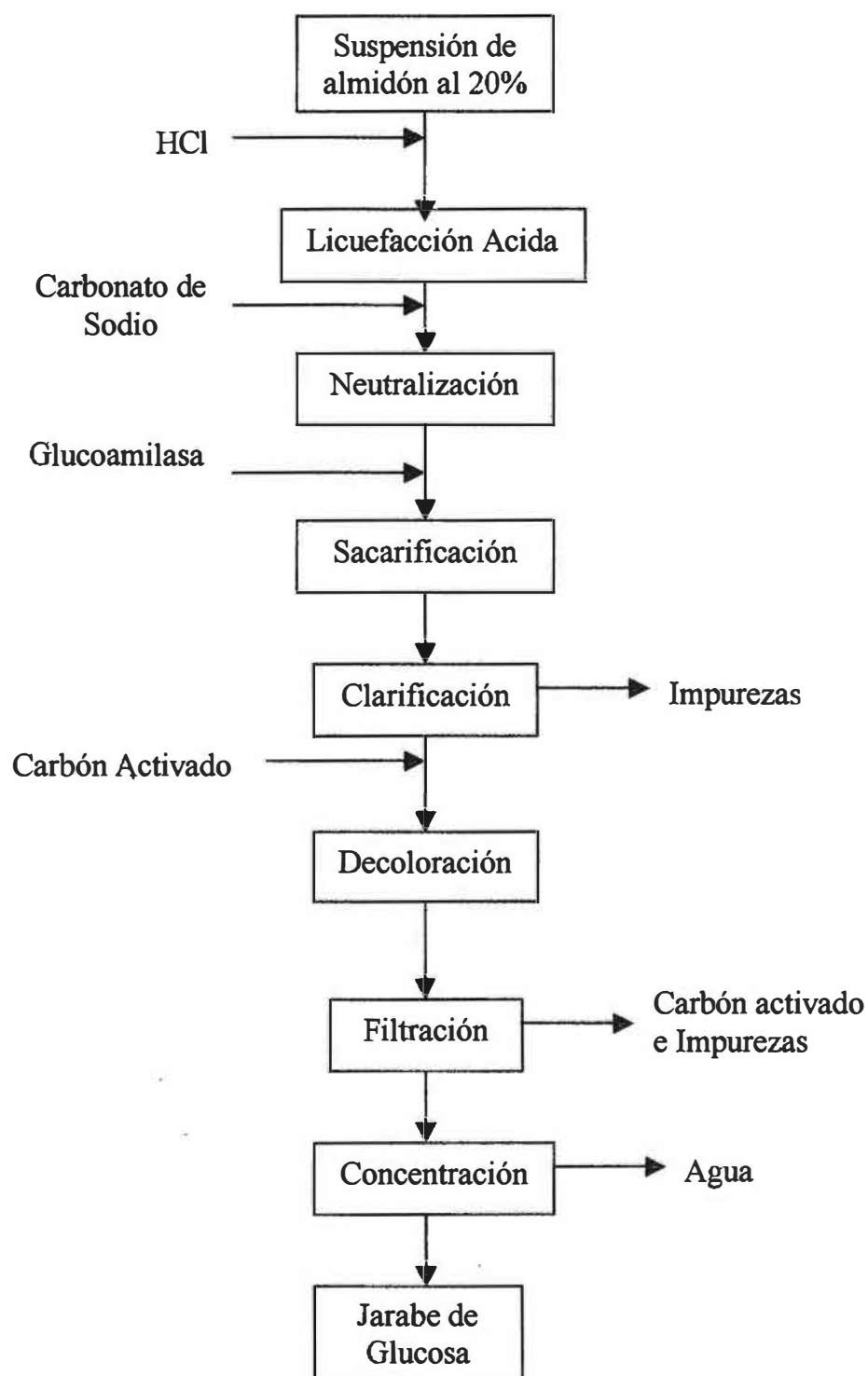
2.6.2-HIDRÓLISIS ACIDA-ENZIMÁTICA

Los jarabes de glucosa de ED mayor a 55 no son producidos comercialmente por conversión ácida, porque las reacciones secundarias durante la hidrólisis generan excesivo color y sustancias indeseables de sabor amargo, no removibles mediante refinación ordinaria.

Los jarabes de glucosa que se obtienen por hidrólisis ácida-enzimática utilizan el mismo proceso que el ácido, seguido de un tratamiento enzimático. Las enzimas utilizadas en este proceso son α -amilasa, β -amilasa o glucoamilasa, dependiendo del producto final deseado.

En la figura 2.7 se presenta un diagrama de flujo donde se muestra las etapas para la obtención de jarabe de glucosa mediante hidrólisis ácida-enzimática.

Figura 2.7: Diagrama de Flujo para la Obtención del Jarabe de Glucosa a partir del Almidón de Yuca mediante Hidrólisis Ácida - Enzimática



2.6.3-HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

Los hidrolizados de alta conversión son preparados casi exclusivamente utilizando de enzimas. La hidrólisis catalizada por enzimas es llevada a temperaturas relativamente bajas y a pH 4,0-5,0 donde los azúcares reductores tienen su máxima estabilidad, sin embargo, las reacciones de reversión catalizadas por enzimas permanecen.

Para conseguir jarabes de alto ED, hay que recurrir a la glucoamilasa, que puede producir, teóricamente jarabe de ED 100. En la práctica comercial, se encuentran corrientemente valores de ED de 92-95. Los jarabes de alto ED, contienen altos niveles de glucosa, por lo que son relativamente dulces. Son casi todos azúcares fermentables y producen soluciones de alta presión osmótica.

2.6.3.1- LICUEFACCIÓN

La licuefacción es una hidrólisis en el que se aplica la α -amilasa. El objetivo de la licuefacción es convertir una suspensión concentrada de gránulos de almidón a dextrinas solubles de baja viscosidad para la conversión fácil a glucosa por la glucoamilasa.

En el proceso de licuefacción, una suspensión de almidón en agua es tratada con hidróxido de calcio (cal apagada) a pH 6,0-7,0, óptimo para las amilasas. Una suspensión de α -amilasa bacteriana es luego adicionada y la suspensión es bombeada dentro de una corriente de vapor donde la temperatura es elevada instantáneamente a 80-115°C y es mantenida a esta temperatura por unos pocos minutos para facilitar la licuefacción.

En la figura 2.8 se presenta el proceso de obtención de jarabe de glucosa por licuefacción en una etapa; mientras que en la figura 2,9 se muestra el diagrama flujo del proceso de obtención de jarabe de glucosa en dos etapas.

El almidón es inmediatamente gelatinizado y, en presencia de la α -amilasa es depolimerizado rápidamente a una masa fluida que es fácilmente manejable, después del cual es reducido a menos de 90°C y mantenido a esta temperatura por 1-3 horas. o hasta que la hidrólisis ha alcanzado entre 15 a 20 equivalentes de dextrosa. En una variación de este proceso, la suspensión de almidón conteniendo compuestos de calcio es calentado entre 120 y 180°C para gelatinizar el almidón, y la α -amilasa es adicionada seguida del enfriamiento entre 90 y 105°C.

La máxima temperatura a la cual la suspensión de almidón conteniendo la α -amilasa puede ser calentada en corriente de vapor es dependiente de la fuente de α -amilasa (estabilidad a la temperatura).

2.6.3.2- SACARIFICACION

El objetivo de la sacarificación es convertir el almidón a D-glucosa con rendimientos tan altos como sea posible observando el tiempo como una restricción económica. Usando la glucoamilasa es posible convertir el almidón casi totalmente (>99%) a D-glucosa, pero no es económicamente factible.

Para propósitos prácticos, las reacciones de hidrólisis de las dextrinas son irreversibles. La primera excepción es la hidrólisis de los disacáridos maltosa e isomaltosa.

Figura 2.8: Diagrama de Flujo para la Obtención del Jarabe de Glucosa a partir del Almidón de Yuca mediante Hidrólisis Enzimática con Licuefacción en Una Etapa.

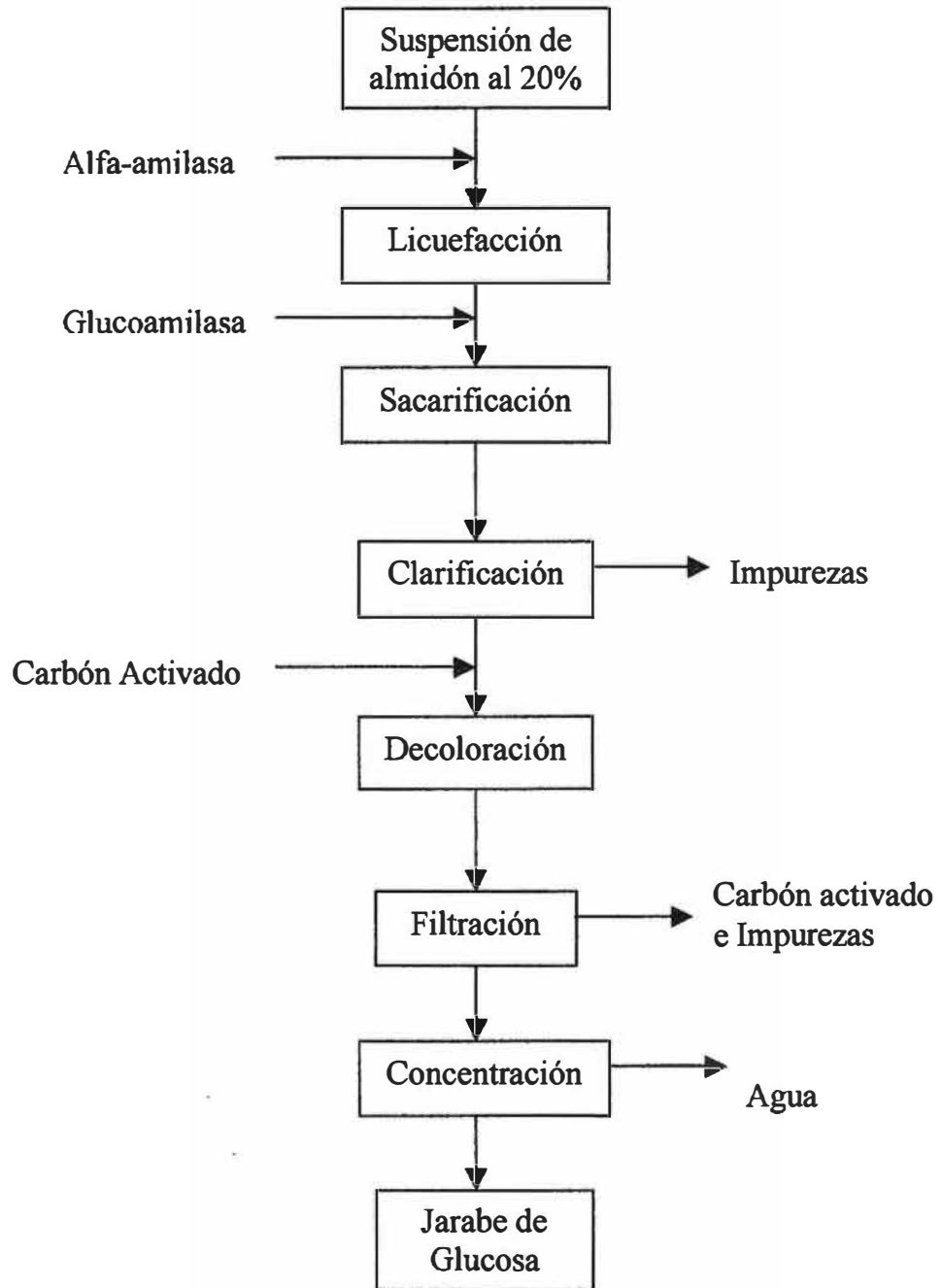
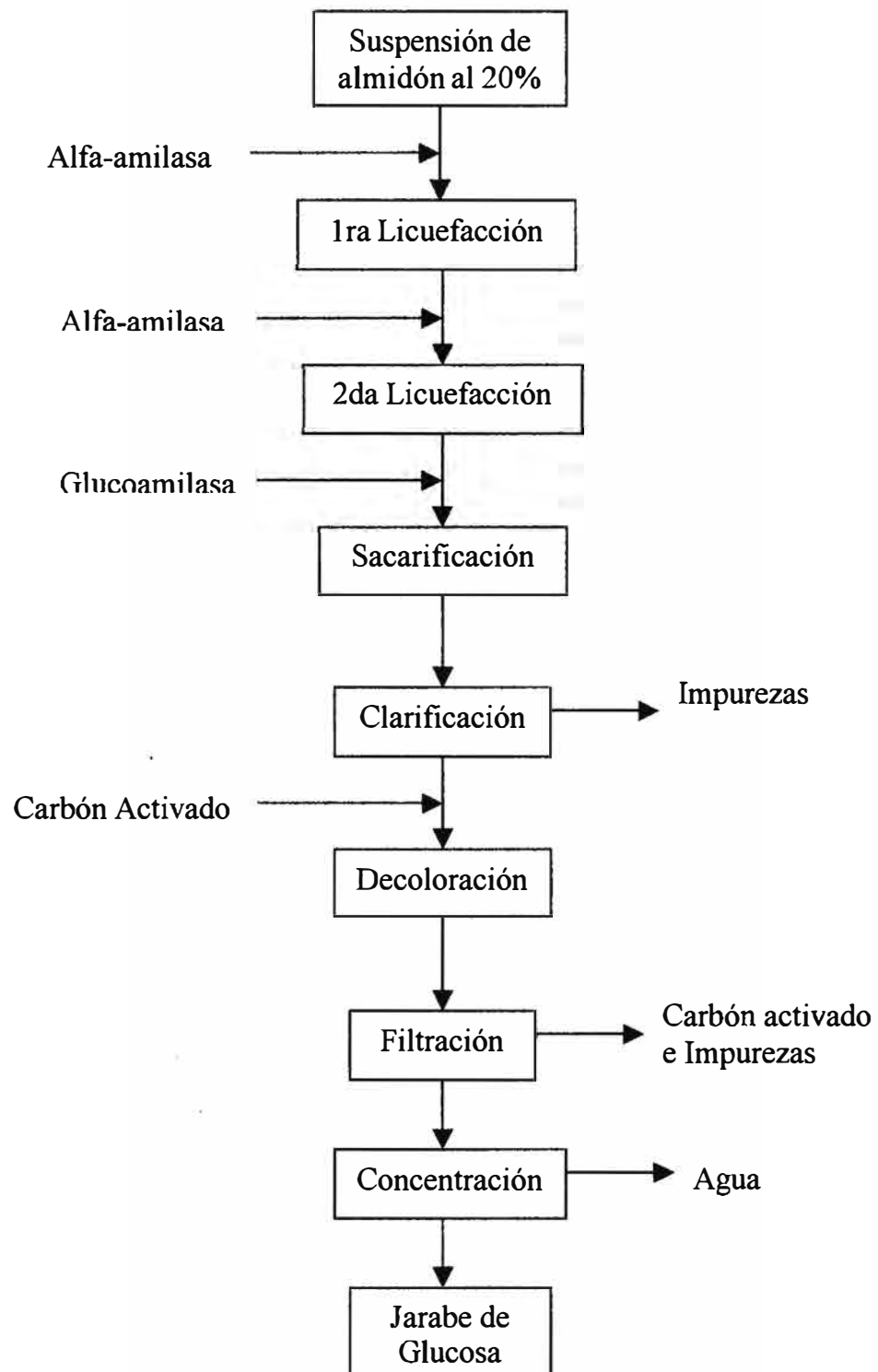


Figura 2.9: Diagrama de Flujo para la Obtención del Jarabe de Glucosa a partir del Almidón de Yuca mediante Hidrólisis Enzimática con Licuefacción en Dos Etapas.



Estas especies pueden aparecer por la degradación de la dextrina y la condensación de glucosa (reversión). Sin embargo, la hidrólisis a D-glucosa no es completa debido a reacciones de condensación que ocurren simultáneamente cuando la D-glucosa es condensada a productos de reversión. La reversión es simplemente una manifestación de la reversibilidad de la hidrólisis.

Algunas ventajas del sistema enzimático en comparación de la catálisis ácida, son que se alcanza mayores rendimientos de dextrosa y la hidrólisis enzimática puede ser llevada a cabo a concentraciones aproximadas de 30% de almidón en base seca, mientras que la hidrólisis del sistema ácido tiene que ser llevada a alrededor del 20% de almidón en base seca, por lo tanto, se necesita evaporar menos agua para concentrar el jarabe.

III.- JARABE DE GLUCOSA A PARTIR DEL ALMIDÓN DE YUCA

3.1- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

3.1.1- OBTENCIÓN DE LA HARINA DE YUCA

El proceso para la obtención de la harina de yuca, básicamente consiste en:

- Recepción
- Selección y lavado
- Pelado
- Trituración
- Secado
- Molienda y tamizado

3.1.2- OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA

3.1.2.1- EL PROCESO

El proceso para la obtención del almidón de yuca consta de las siguientes etapas:

- Recepción
- Selección
- Lavado y pelado
- Desintegración
- Extracción
- Tamizado Fino
- Envasado

El proceso de producción de almidón de yuca se inicia con la llegada de las raíces de yuca a la planta de procesamiento, asimismo el ingreso de los materiales de elaboración y otros insumos necesarios para la obtención de este producto, las etapas se describen a continuación:

a- Recepción:

Las raíces de yuca procedentes de los campos de cultivo, llegan a la planta, luego las raíces son almacenadas en ambientes de madera. El diámetro medio de las raíces es de 4-5 cm.

b- Selección

Consiste en separar mecánicamente o manualmente las raíces no aptas, es decir con signos de golpes, manchas en la superficie y otras características que alteren las propiedades, ingresando solo al proceso las raíces en buen estado de conservación

No existe especificación para la forma y el tamaño de las raíces, solo en esta parte se selecciona que no tengan signos de pudrimiento.

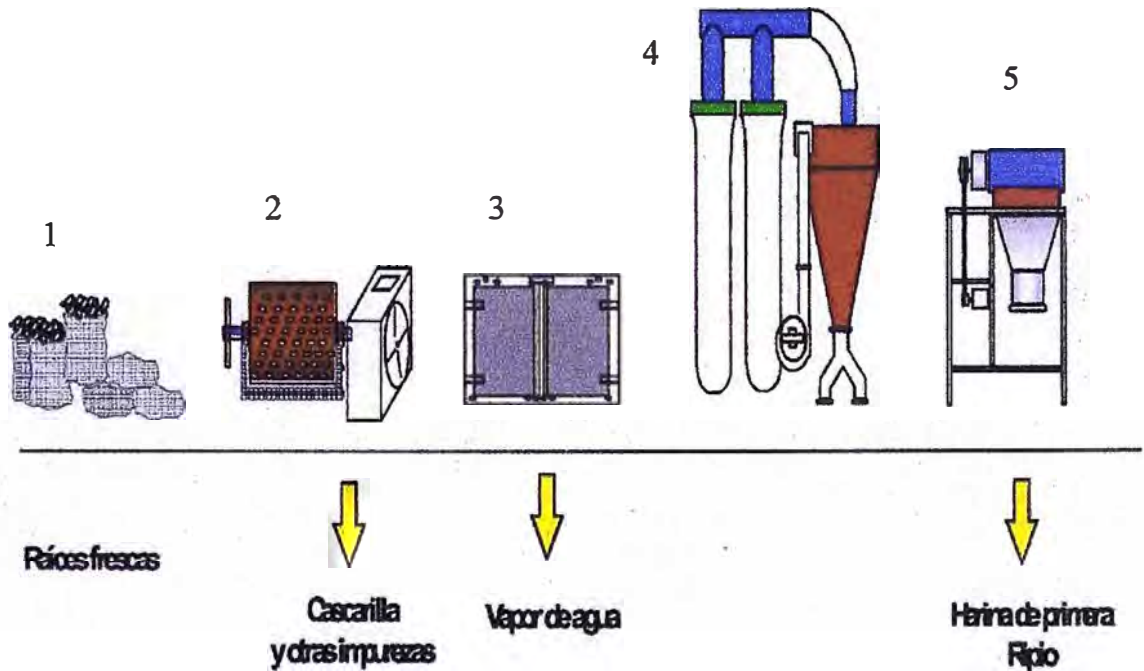
c- Lavado y Pelado

Las raíces seleccionadas son alimentadas a un lavador.

La operación de lavado tiene dos partes: Una parte limpia las raíces de la presencia de tierra y de otras sustancias extrañas adheridas a la superficie, y la otra parte de lavado, consiste en el pelado de la corteza de la yuca.

El buen lavado permite tener un producto más fino, ya que muchas impureza se parecen a las del almidón tanto en tamaño como en peso específico. Por eso solo pueden ser eliminadas en el lavado.

Figura 3.1: Esquema para la Obtención de Harina de Yuca



Operaciones:

1: Recepción de Raíces frescas

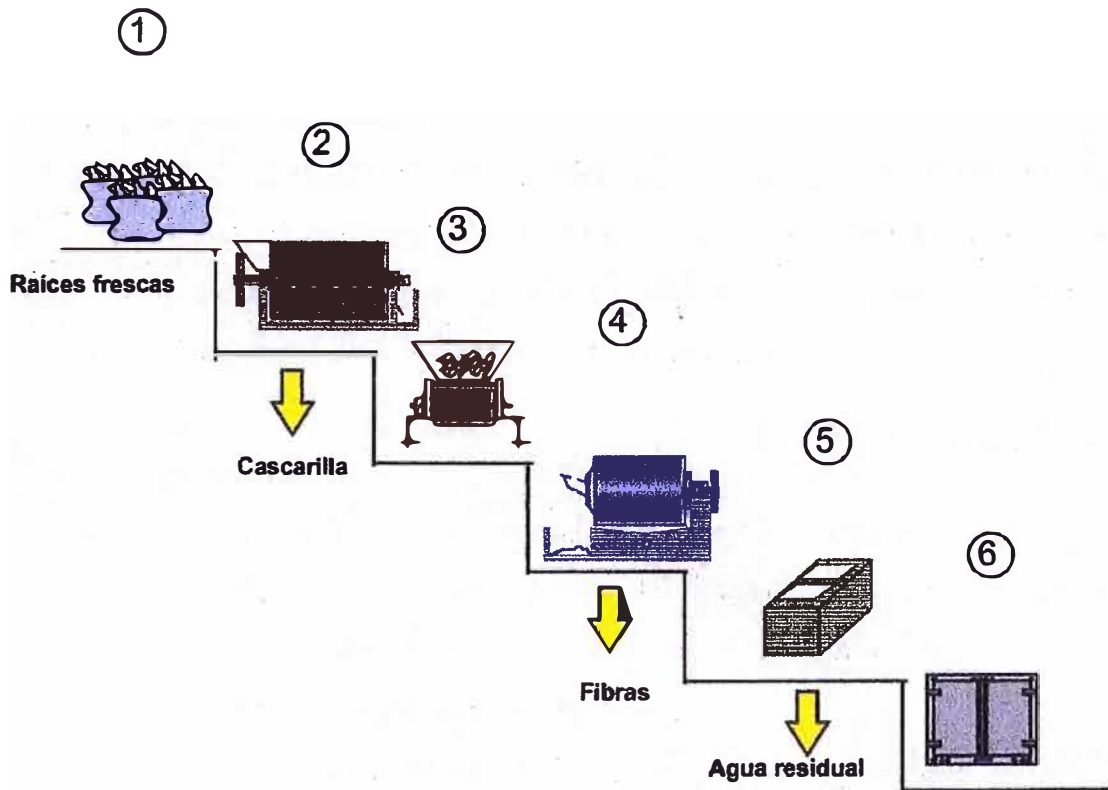
2: Lavado y desintegrado

3: Secado

4: Molienda

5: Tamizado

En la Figura 3.1 se muestra en forma esquemática los pasos para la obtención de la harina de yuca.

Figura 3.2: Esquema General para la Obtención de Almidón de Yuca**Operaciones:**

- 1: Recepción de las raíces frescas**
- 2: Lavado**
- 3: Desintegrado**
- 4: Colado**
- 5: Extracción**
- 6: Secado**

En la Figura 3.2 se muestra un esquema general para obtención del almidón de yuca.

La fricción entre las raíces permite la eliminación de las impurezas. Esta operación se realiza en un tambor cilíndrico de eje central con capacidad de 250 Kg. y gira a 35 rpm, con un caudal de agua promedio de 28 L/min.

d- Desintegración

Consiste en el desintegrado de las raíces por medio de una cortadora, que realiza el corte en trozos pequeños de aprox. 3mm de espesor con los cuales se produce la ruptura de las paredes celulares para la liberación de los gránulos del almidón.

e- Extracción

El almidón es separado de la celulosa y se realiza por medio de un extractor de múltiples etapas. La leche de almidón que sale del primer extractor es bombeado a otro extractor del mismo tipo teniendo tamices mas finos.

La leche de almidón crudo que sale del último tamizador contiene proteínas, sustancias contaminantes, etc. y sustancias insolubles como celulosa y partículas del desintegrado.

f- Tamizado Fino y Secado

En la que se realiza la filtración final para la eliminación de todo tipo de elementos extraños.

g- Envasado:

Una vez que se han eliminado todo tipo de impurezas, se procede al envasado del almidón de yuca como un primer subproducto del proceso productivo.

3.1.2.2- COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Los procesos más importantes para producir almidón son:

Proceso Lote

Proceso Continuo

Proceso Mixto

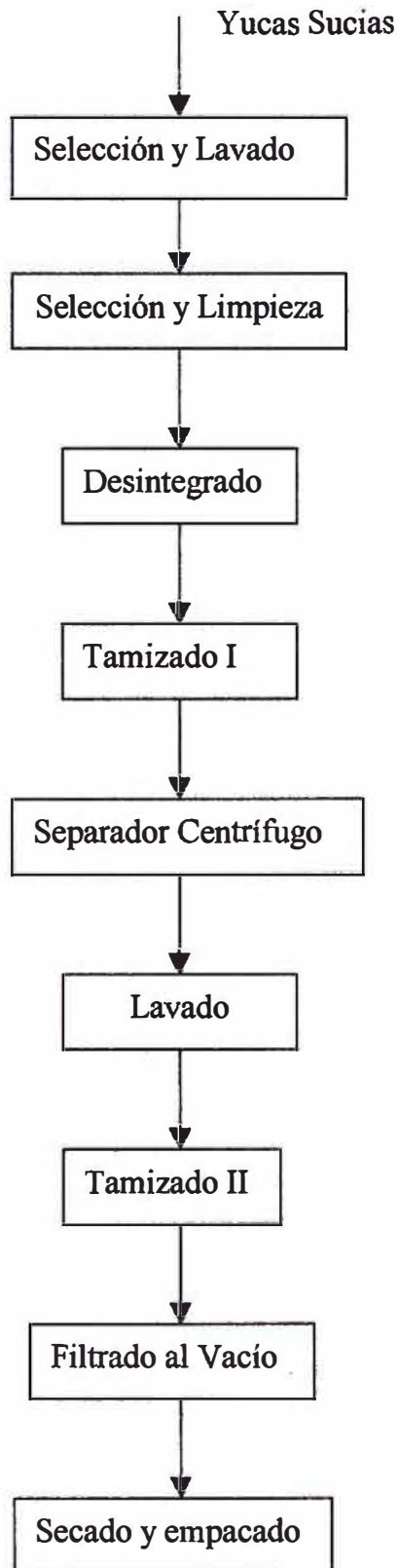
PROCESO LOTE

Las etapas de esta tecnología son:

1. Selección de la materia prima
2. Lavado
3. Selección y limpieza
4. Desintegrado
5. Tamizado I
6. Separador Centrifugo
7. Lavado
8. Tamizado II
9. Filtrado al vacío
10. Secado
11. Empacado.

Las diferentes variedades de yuca son seleccionadas previamente y luego ingresan a la fase de lavado para eliminar tierras y piedras adheridas a la superficie de las raíces.

Las raíces ya lavadas son sometidas a una separación manual y luego son trituradas en una cortadora mecánica con la finalidad de romper las células y liberar el almidón.

Figura 3.3: Diagrama de Flujo para el Proceso Lote

La suspensión de almidón es bombeado a un separador rotatorio-tamizador que consiste en un juego de tamices y zarandas. El almidón atraviesa la zaranda inferior y la pulpa fina corre a un depósito de separación conjuntamente con las partículas gruesas. La lechada de almidón final trae rastros de pulpa y otros sólidos siendo su recuperación total del 90.5%.

En el separador centrífugo se separa el agua proteínica del almidón.

El almidón libre de proteínas es removido con agua y se tamiza nuevamente para eliminar las fibras restantes en una zaranda de malla 120. El almidón húmedo es llevado hacia un filtro al vacío obteniéndose un producto uniforme.

Finalmente el almidón con 40% de humedad ingresa a un secador tipo flash, donde las partículas son removidas por un flujo de aire caliente rápidamente. El almidón sale con 13% de humedad.

PROCESO CONTINUO

Existen 2 métodos continuos para la producción de almidón por el proceso continuo y estos son:

A. El primer método consta de las siguientes etapas:

1. Lavado
2. Molienda
3. Primera Separación
4. Separación del agua proteínica
5. Primera Refinación
6. Segunda Refinación
7. Filtrado al vacío

8. Secado

9. Envasado

En la etapa del lavado, las raíces de yuca caen en el flujo de agua hasta un transportador inclinado eliminándose la tierra y suciedad.

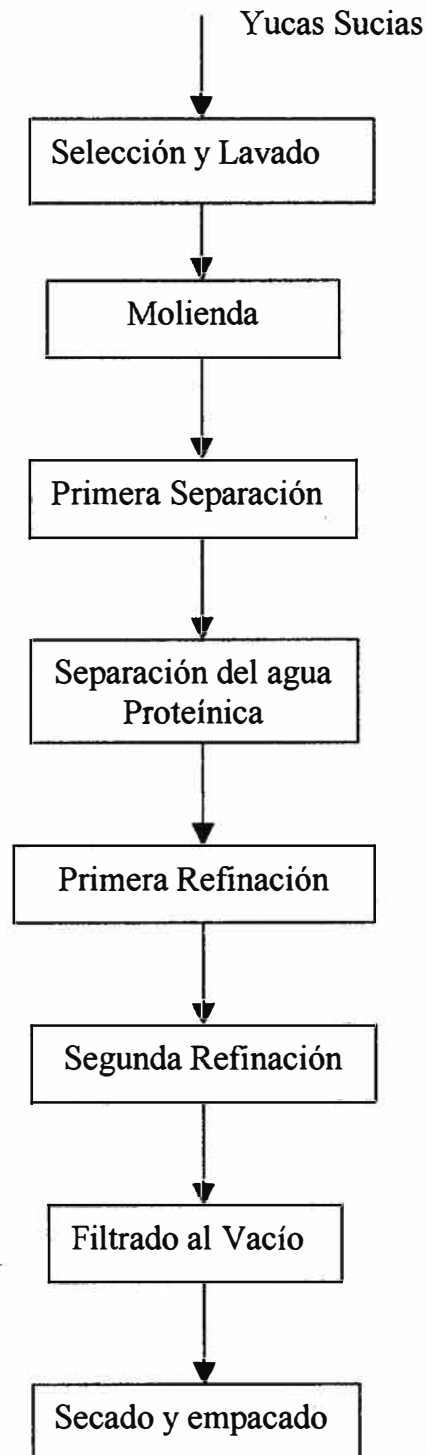
Del transportador van hacia los lavadores en serie; las raíces pasan de un compartimiento a otro accionadas por paletas giratorias.

Las raíces ingresan a un depósito abierto por medio de un elevador de cubos que actúa como alimentador. Un alimento regular de raíces es suministrado por un transportador helicoidal al molino de rodillos para desintegrar las raíces a un diámetro medio de malla 100.

El producto de molienda cae a un depósito donde se mezcla con bisulfito de sodio con la finalidad de inhibir la acción de enzimas oxidantes; la cantidad de agua utilizada debe permitir la flotación de la pulpa.

La suspensión obtenida es bombeada a un separador rotatorio que consiste en una serie de tamices rotatorios y zarandas; la pulpa ingresa primero al tamiz inferior. Las partículas más grandes que quedan son diluidas y pasadas a través de un molino a un depósito.

Las más finas y el almidón caen a la zaranda inferior donde el almidón atraviesa la zaranda (recuperación del 85% del almidón que ingresa) y la pulpa fina pasa al depósito juntamente con el producto de molino. Se agrega agua al depósito y se recircula al tamiz rotatorio (malla 200) donde es retenido y el resto del almidón que puede quedar pasa a través de ella y es desechado. La lechada que

Figura 3.4: Diagrama de Flujo para el Primer Proceso Continuo

resulta trae rastros de pulpa y otros sólidos y representa una recuperación total del 90%.

En un separador centrífugo continuo el almidón es separado del agua proteínica. La lechada que proviene de esta etapa es pasada por una zaranda de malla 120 (primera refinación) para eliminar la pulpa fina que haya podido quedar.

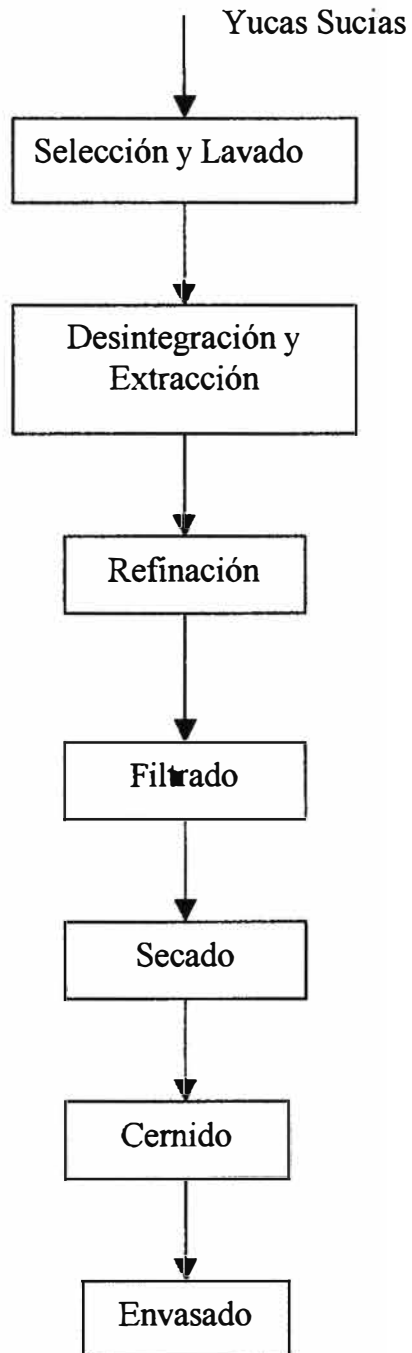
La segunda refinación es realizada en una centrifugadora horizontal, donde la lechada ingresa con una densidad de 1.03 g/l y sale con 1.18 g/l. El almidón húmedo obtenido es sometido a la acción de un filtro al vacío el que da un producto de calidad uniforme con 40% de humedad.

En el secado tipo flash se evapora la humedad del almidón hasta un 12%.

B. El segundo método del proceso continuo considera las siguientes etapas:

1. Lavado
2. Desintegración y Extracción
3. Refinación
4. Filtrado
5. Secado
6. Cernido
7. Envasado

En la etapa de desintegración y extracción son utilizadas raspadores para reducir las raíces a pulpa, posteriormente es mezclado con SO₂ y llevados a un separador rotatorio en que la fuerza centrífuga impulsa

Figura 3.5: Diagrama de Flujo para el Segundo Proceso Continuo

a la pulpa a la periferia obligándola a separarse de la lechada de almidón.

La refinación se realiza en 3 etapas:

En la primera refinación, la pulpa ingresa desde el tanque de alimentación al separador centrífugo donde se elimina la mayor parte del agua proteínica y es reemplazada por agua fresca con el objeto de limpiar el concentrado de almidón. Este almidón resultante abandona los separadores a una concentración de 10° Be y la proteínica es descargada al desagüe.

En la segunda refinación, la lechada de almidón ingresa a una segunda etapa de separación donde el almidón nuevamente es lavado. En la tercera refinación, la lechada es alimentada a una zaranda vibratoria para separar la fibra fina. El almidón es bombeado a un tercer separador y luego a un filtro rotatorio. El almidón húmedo que ingresa al filtro al vacío proviene de la tercera refinación donde sale con 38% de humedad. El secador tipo flash remueve rápidamente la humedad por el movimiento de las partículas húmedas en un flujo de aire caliente. El almidón sale con 12% de humedad.

PROCESO MIXTO

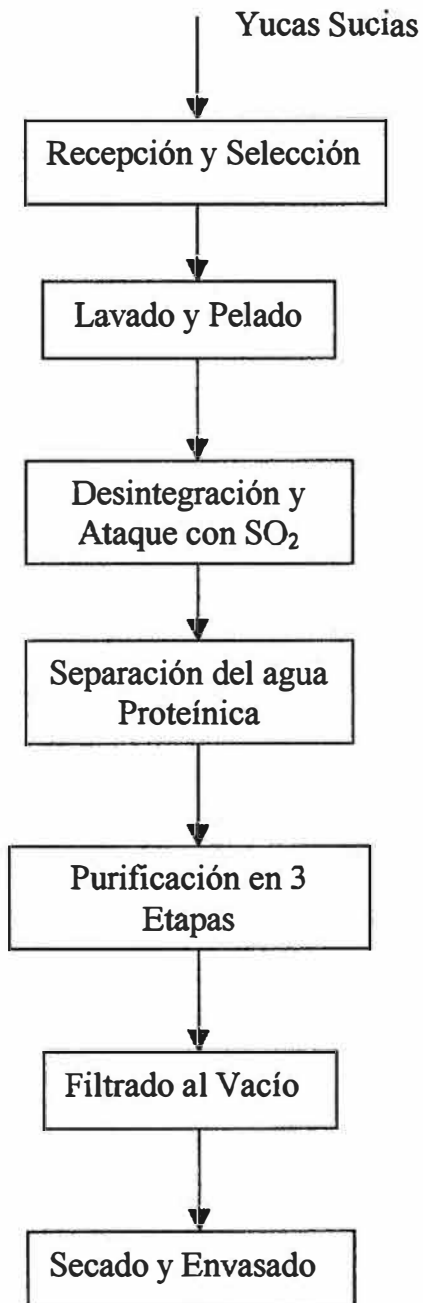
Este proceso combina el proceso lote y el proceso continuo, operándose en batch las primeras etapas hasta la extracción. Las etapas que incluye este proceso son:

1. Recepción
2. Selección
3. Lavado y pelado

4. Desintegración y ataque con SO₂
5. Purificación en 3 etapas
6. Filtrado al vacío
7. Secado
8. Cernido
9. Envasado

Las raíces de yuca son seleccionadas manualmente; Mediante un transportador de faja inclinado, las raíces seleccionadas son alimentadas al tanque de lavado y pelado, eliminándose la suciedad y la tierra adherida, pelándose la piel mediante dentadas de acero inoxidable. Las raíces lavadas y peladas son llevadas a la etapa de desintegración y extracción; en esta etapa las raíces son cortadas en trozos pequeños por medio de una cortadora mecánica y para facilitar la operación se adiciona agua tratada con SO₂ que actúa como antifermamento.

La etapa de purificación se realiza en 3 etapas similares al proceso 2 donde se separa el almidón de la celulosa. El primer y segundo separador son del mismo tipo, siendo la lechada de almidón alimentada al filtro al vacío donde sale con 40% de humedad e ingresa al secador tipo flash donde sale con 11,7% de humedad.

Figura 3.6: Diagrama de Flujo para el Proceso Mixto

3.1.2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SELECCIONADO PARA LA OBTENCIÓN DE ALMIDÓN

Básicamente existen dos procesos para la producción del almidón: lote y continuo. Analizando ambos procesos se determina que el continuo es superior al lote en lo que respecta a la obtención de calidad de producto, asimismo el rendimiento del almidón es superior en 84,2% contra el 71,2% del proceso lote.

Comparando las tecnologías del proceso continuo, el método 1 presenta una eficiencia de recuperación del 85%, mientras que el método 2 presenta una eficiencia superior al 95%. El método 2 representa una mayor inversión inicial que se compensa por sus ventajas en calidad del producto final y mayor rendimiento; pero para mercados no tan exigentes de calidad se puede emplear el método 1, que se adecua especialmente a pequeña escala.

Adoptando una tecnología de instalación sencilla y de costo limitado, se selecciona el proceso de tecnología mixta que combina el método batch con el continuo.

El proceso mixto comprende las siguientes etapas:

a. Recepción y Selección

Las raíces son almacenadas en cajones de madera y luego se seleccionan las que estén en buen estado de conservación.

b. Lavado y Pelado

Las raíces seleccionadas son alimentadas mediante una faja transportadora a la sección de lavado y pelado. Esta operación se

realiza en 2 fases: una parte limpia la tierra y la otra parte del lavado consiste en el pelado de la piel solamente.

El pelado se lleva a cabo mediante un baño de agua por aspersion y usando a su vez unas paletas dentadas de acero inoxidable.

c. Desintegración y Ataque con SO_2

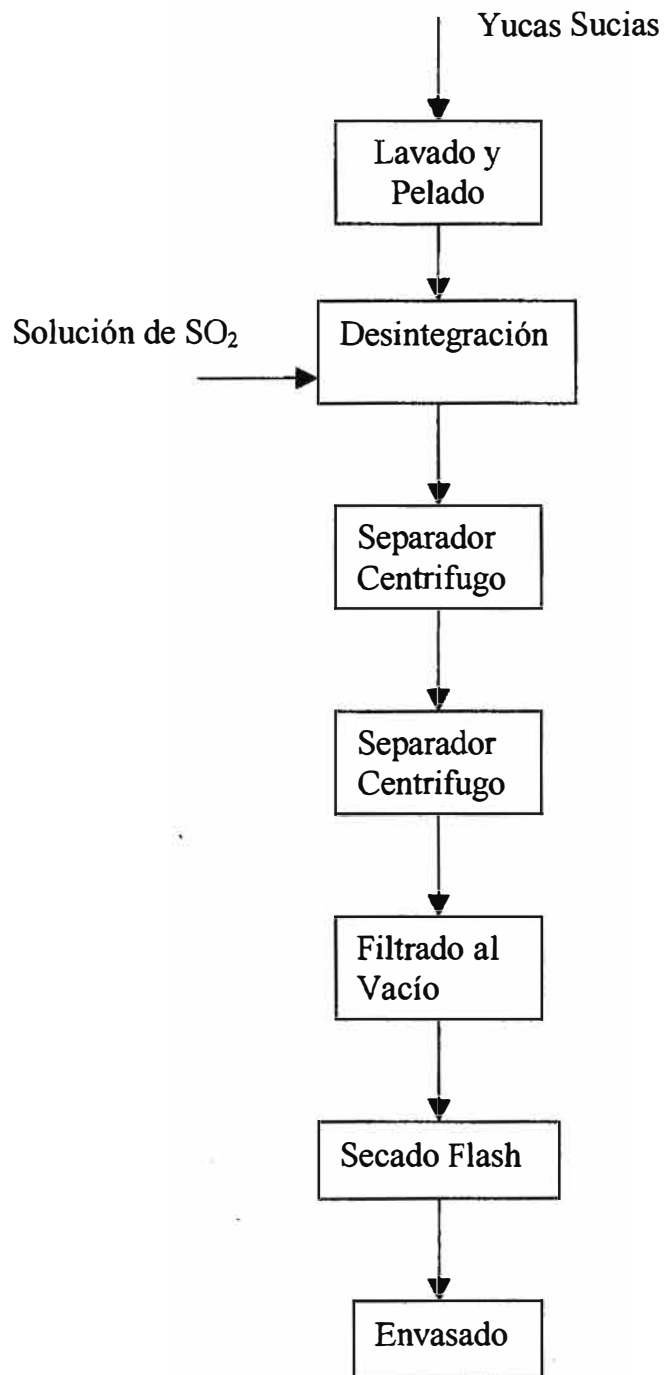
El objetivo es reducir las raíces a pulpa y liberar el contenido de almidón. Las raíces peladas ingresan a un deposito que actúa como alimentador de la cortadora mecánica que realiza cortes en trozos de aproximadamente 3 mm de espesor. Para facilitar esta operación es necesario adicionar agua previamente tratada con bisulfito de sodio al desintegrador ($\frac{1}{2}$ libra de SO_2 / Tm. de Almidón). El jugo que se tiene luego de esta operación es rico en azucres y proteínas, cuando las células se abren, el jugo inmediatamente reacciona con el oxígeno formando compuestos coloreados que se pueden adherir al almidón. Para evitar estas coloraciones desagradables se añade dióxido de azufre o bisulfito de sodio en solución. El gran poder reductor de los compuestos de azufre previene la coloración.

La pulpa es bombeada a un tanque de alimentación de la sección de purificación.

d. Purificación en 3 etapas:

En la primera etapa se elimina el agua proteinica; en las siguientes operaciones se lava el almidón.

En la figura 3.7 se muestra el diagrama de bloques que indica las operaciones para la obtención de almidón por el método mixto seleccionado en el estudio.

Figura 3.7 Diagrama de Operaciones para la Obtención de Almidón

En la primera purificación, la pulpa ingresa desde el tanque de alimentación con una densidad de 2,5°Be. Allí la mayor parte del agua proteínica es reemplazada por agua fresca que ingresa a través de un orificio a la separadora centrífuga para limpiar el concentrado de almidón. El agua libre de almidón (agua proteínica) es descargada al desagüe.

En la segunda purificación, la lechada de almidón ingresa a una segunda etapa de separación donde el almidón nuevamente es lavado.

En la tercera purificación, la lechada es alimentada a una zaranda vibratoria para separar la fibra final.

e. Filtrado al Vacío

El almidón húmedo proveniente de la tercera purificación es sometido a la acción de un filtro continuo al vacío el que da un producto con 38% de humedad.

f. Secado

En el secador flash se reduce el contenido de humedad del almidón hasta 11,7% por acción de aire caliente.

3.1.3.- HIDRÓLISIS DEL ALMIDÓN DE YUCA

3.1.3.1. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

La hidrólisis enzimática del almidón de yuca consiste en una licuefacción seguida de una sacarificación. Para la licuefacción se reportó dos tipos de α -amilasa, una termoestable proveniente de *B.*

Licheniformis y la otra menos termoestable proveniente de *B. Subtilis*. La sacarificación se realizó con glucoamilasa de *A. Níger*.

3.1.3.1.1. LICUEFACCIÓN ENZIMÁTICA

Para la licuefacción enzimática en una etapa se usa la enzima de *B. Licheniformis* (termoestable) y en dos etapas la enzima de *B. Subtilis* (menos termoestable). En este proceso, como variables de control, se tiene la influencia de la concentración de almidón, la concentración de enzima en la hidrólisis, el pH, el tiempo de hidrólisis, y el volumen de suspensión de almidón.

Licuefacción Enzimática en una etapa

En la licuefacción enzimática en una etapa se puede lograr un mayor grado de conversión utilizando los parámetros de la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros de la Licuefacción Enzimática en Una Etapa

Parámetros	Valores
Vol. de Solución	50 mL. de Susp. Almidón
pH	6.2
Temp. de Hidrólisis	92°C
Suspensión de Almidón	20% m/v
Tiempo de Hidrólisis	120 min.
Conc. De Enzima	0.01%

Con los valores de los parámetros indicados en la tabla 3,1 se logra obtener un ED de 41,44.

Como característica de esta hidrólisis es que tiene una tendencia lineal hasta los 30 minutos aprox. lo que indica que la enzima se encuentra saturada de sustrato, y por lo tanto la velocidad de la reacción es máxima; luego de este tiempo la velocidad de formación de producto disminuye lentamente.

Licuefacción Enzimática en dos etapas

En la licuefacción enzimática en dos etapas se puede lograr un mayor grado de conversión aplicando los parámetros de la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros de la Licuefacción Enzimática en Dos Etapas

Parámetros	Valores
Vol. de Solución	50 mL. de Susp. Almidón
pH	6,0
Temp. de Hidrólisis	70°C
Suspensión de Almidón	35% m/v
Tiempo de Hidrólisis	120 min.
Conc. De Enzima	0.001%

Con los valores de los parámetros indicados en la tabla 3,2 se logra obtener un ED de 23,88.

Como se puede observar a partir de la segunda adición de enzima la reacción progresa lentamente, es decir la velocidad de hidrólisis es

baja. En consecuencia estos resultados de ED demuestran que con la enzima termoestable se obtiene mayor grado de licuefacción en el mismo tiempo de hidrólisis.

De los resultados obtenidos anteriormente (ED de 41,44 y ED de 23,88) en la licuefacción se puede decir que el empleo de la enzima termoestable tiene ventajas sobre la enzima menos termoestable, ya que se obtiene mayor velocidad de reacción lo que conlleva a menores tiempos de licuefacción.

3.1.3.1.1. SACARIFICACIÓN ENZIMÁTICA

La sacarificación enzimática es el paso siguiente sobre las soluciones resultantes de la licuefacción para así completar la hidrólisis enzimática y degradar completamente el almidón a glucosa. En este proceso, las variables que se controlan son la influencia de la concentración de almidón, la concentración de enzima en la hidrólisis, el pH, el tiempo de hidrólisis, y el volumen de suspensión de almidón.

- Sacarificación Enzimática de la Solución Licuefactada en una Etapa

En la Sacarificación enzimática de las soluciones licuefactadas en una etapa se puede lograr un mayor grado de conversión con los parámetros que se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros de la Sacarificación Enzimática en Una Etapa

Parámetros	Valores
Vol. de Solución	50 mL. de Susp. Almidón
pH	4,5–6,0
Temp. de Hidrólisis	60°C
Suspension de Almidón	30% m/v
Tiempo de Hidrólisis	68 hrs.
Conc. De Enzima	0.0001%

Con la aplicación de estos parámetros se logra un solución con un ED de 92,66.

En las figuras 3.8 y 3.9 representan los avances de la reacción de licuefacción del almidón utilizando α -amilasa de *B. Subtilis* y *B. Licheniformis*

Ninguno de los tratamientos proporciona una hidrólisis completa, lo cual se podría deber a que las soluciones concentradas, pobremente dispersadas, son atacadas lentamente por la glucoamilasa, sin embargo se puede trabajar con concentraciones de almidón de yuca de 40% para obtener jarabes de glucosa comercial.

Figura N° 3.8: Avance de la Reacción de Licuefacción del Almidón utilizando α -amilasa de *B.Subtilis* y *B.Licheniformis*

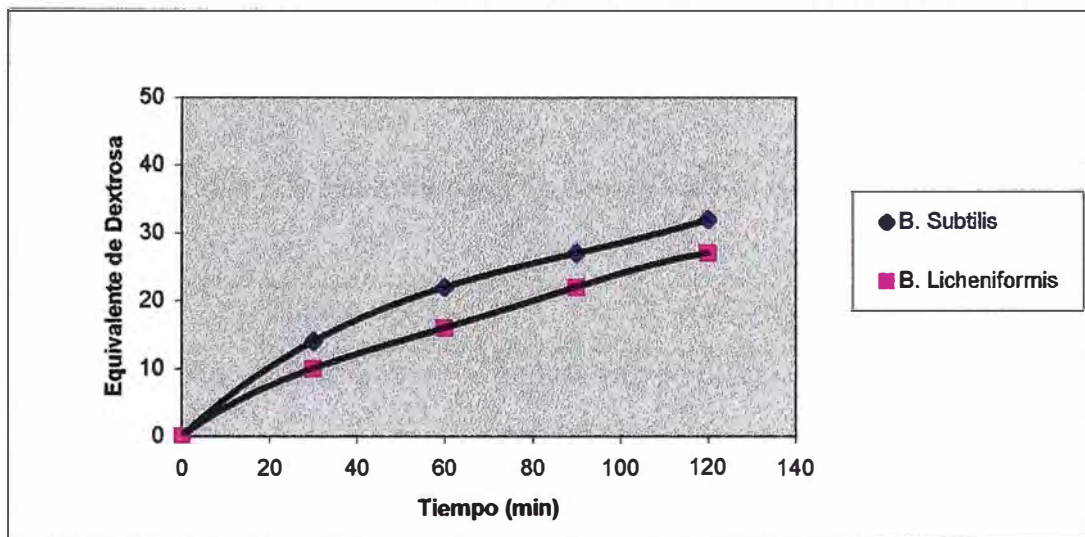
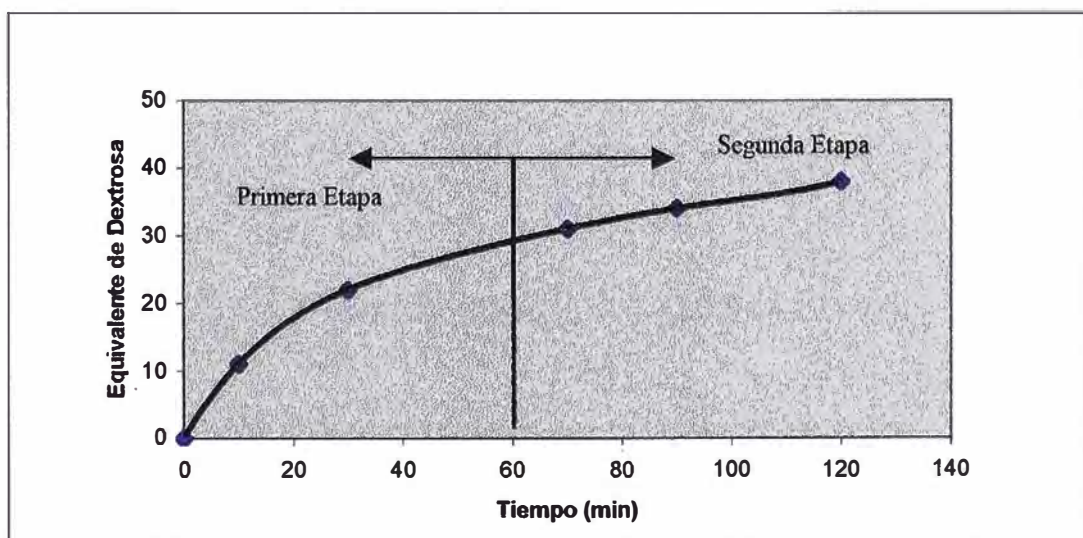


Figura N° 3.9: Avance de la Reacción de Licuefacción en dos etapas



- Sacarificación Enzimática de la Solución Licuefactada en Dos Etapas

En la Sacarificación enzimática de las soluciones licuefactadas en dos etapas se puede lograr un mayor grado de conversión con los parámetros que se indican en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Parámetros de la Sacarificación Enzimática en Dos Etapa

Parámetros	Valores
Vol. de Solución	50 mL. de Susp. Almidón
pH	4,5–6,0
Temp. de Hidrólisis	60°C
Suspension de Almidón	35% m/v
Tiempo de Hidrólisis	68 hrs.
Conc. De Enzima	0.001%

Con la aplicación de estos parámetros se logra un solución con un ED de 81,58.

3.1.3.2. HIDRÓLISIS ÁCIDA – ENZIMÁTICA

Esta técnica consiste en una licuefacción en medio ácido, seguida de una sacarificación con glucoamilasa.

La hidrólisis ácida se realiza en 10 minutos, luego de esto se procede a darle las condiciones necesarias para que actúe 0.01% (v/v)

de glucoamilasa, y posterior sacarificación a 60°C con agitación constante.

La solución proveniente de la licuefacción enzimática tiene una mayor conversión que la proveniente de hidrólisis ácida en las primeras horas, luego del cual se invierte logrando así que la hidrólisis ácido-enzimática alcance un mayor ED.

Esto probablemente se deba a que en la hidrólisis ácida los enlaces α -(1,4) sufren hidrólisis más fácilmente que los α -(1,6). Por lo tanto es posible que la solución licuefactada con ácido proporciona a la sacarificación una composición con menos enlaces α -(1,6) y polisacáridos con menor masa molecular que la solución licuefactada por medio enzimático. Al actuar la glucoamilasa, la velocidad de hidrólisis es mayor sobre los oligosacáridos de mayor masa molecular y en las soluciones que contienen menos enlaces α -(1,6). La glucoamilasa hidroliza más fácilmente los enlaces α -(1,4) que los enlaces α -(1,6) y con mayor facilidad los polisacáridos de mayor masa molecular que los de baja masa molecular.

Con la hidrólisis ácido-enzimática se puede obtener jarabes de hasta 95 de ED.

3.1.3.3. HIDRÓLISIS ÁCIDA

En la hidrólisis ácida, la suspensión de almidón al 20% (m/v) acidulada con HCl 0.03M hasta alcanzar un pH de 1,8 es tratada a 135°C.

Existe una relación directa entre el grado de hidrólisis y el tiempo de hidrólisis. Se puede llegar a obtener un ED cercano a 90 luego de 70 minutos de hidrólisis; posteriormente el grado de hidrólisis disminuye con el tiempo, esto se debe probablemente a que se producen reacciones de reversión y deshidratación lo que origina disminución de D-glucosa.

3.1.4.- OBTENCIÓN DEL JARABE DE GLUCOSA

Para obtener el jarabe de glucosa, las soluciones hidrolizadas fueron clarificadas, decoloradas, filtradas y concentradas.

3.1.4.1. CLARIFICACIÓN

Los hidrolizados resultantes son de color ambar y turbios, para separar las partículas en suspensión es necesario una posterior centrifugación a 16 000 RPM por 15 minutos obteniéndose un líquido ambar transparente. En esta primera etapa se logra la remoción de fibras y proteínas insolubles..

3.1.4.2. DECOLORACIÓN

El hidrolizado clarificado se trata con 1% de carbón activado a 55°C durante 30 minutos y agitación constante. Esta operación se realiza para extraer el color, los precursores del color y materiales indeseables de sabor y color.

3.1.4.3. FILTRACIÓN

La filtración se realiza en caliente es decir inmediatamente después de decolorada la solución, esta operación se realiza con la

finalidad de separar el carbón activado añadido en la decoloración del hidrolizado.

3.1.4.4. CONCENTRACIÓN

La concentración se realiza en evaporador rotatorio al vacío (50 – 55°C). La finalidad de esta operación es eliminar el agua llevando la solución a niveles de sólidos solubles de un 80%.

3.1.4.5. PRODUCTO FINAL

Los jarabes obtenidos a través de los diferentes procesos son mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resultados del Producto final

	H. Enzimática	H. ácida	H. ácida-enzimática
ED	97,77	70,92	92,3

Con la solución al 30% (m/v) se puede obtener un ED de 98, con la de 35% (m/v) de almidón 94 y con la proveniente de hidrólisis enzimática 92. Como ya se mencionó, los hidrolizados de alta conversión tiene dos aplicaciones principales que son como una fuente de D-glucosa para la producción del jarabe de alta fructosa y el otro como una fuente de dextrosa cristalina.

Los jarabes obtenidos por vía ácida no alcanzan el 90% de D-glucosa, debido a reacciones de reversión y deshidratación originando una disminución de D-glucosa.

IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los diferentes métodos de hidrólisis presentados, con la hidrólisis enzimática se obtiene elevado valor de ED y alto contenido de glucosa.
- Para la Hidrólisis enzimática, es necesario la acción de dos enzimas, la α -amilasa y la amiloglucosidasa para degradar completamente el almidón, pues ambas tiene diferentes puntos de acción dentro de la molécula del almidón.
- El control de temperatura para los procesos de hidrólisis enzimática debe ser muy preciso pues existen rangos de temperatura donde la enzima se inhibe y ya no tiene acción para la degradación.
- El presente informe nos da una visión de cómo lograr la obtención de la glucosa utilizando biotecnología, pero se recomendaría hacer un estudio técnico-económico para una zona determinada donde se pueda elaborar jarabe de glucosa asequible a la demanda.

V.- BIBLIOGRAFIA

- **Benavides M. y Cabrera J. Elaboración de Productos alimenticios a base de Harina de arroz mediante Hidrólisis Enzimática.** Revista del Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Colombia. 1984. 25(151):9-36.
- **Brooks, J. y Griffin, V. Liquefaction of Rice starch from Milled Rice Flour Using heat-Stable Alpha-amylase.** 1987. Journal Food Science. 52(3): 712-714.
- **Cheftel, J. Y Cheftel, H. 1976. Introducción a la Bioquímica y Tecnología de Alimentos.** Vol I Editorial Acribia, S.A. Zaragoza.
- **Lages, A. y Tannenbaum, S. Production de Glucose from Tapioca (Cassava starch) and Farinha de mandioca (Cassava Meal).** 1978. Journal Food Science. 43(5): 1012-1014.
- **Lee, Y. y Kim, K. Gelatinization y Liquefaction of Starch with a Heat stable α -amylase .** 1990. Journal Food Science 55(5): 1365-1366.
- **Lehninger, A. Bioquímica.** 1979. Segunda edición. Ediciones Omega S.A. Barcelona.
- **Schmidt-Hebbel, H. y Pennachiotti, I. Las Enzimas en los Alimentos. Su Importancia en la Química y Tecnología de los Alimentos.** 1982. Alfabet Impresores. Santiago de Chile. 94 Pag.
- **Soto, R. Obtención de Glucosa por Hidrólisis enzimática del Almidón de Yuca.** 1989. Revista Boliviana de Química. Vol.8. N°1: 17-21.

- Novo Nordisk S.A. Sin Fecha. **Hojas Técnicas de: Termamyl 120L, AMG 400L .**
- Novo Nordisk S.A. Sin fecha. **Enzimas Novo Nordisk para la Industria del Almidón**
- Valoración de la Yuca en América Latina. **Industrialización de la Yuca. 1989. Colombia**

VII APÉNDICE

1. ASPECTOS RELEVANTES SOBRE LOS EQUIPOS A USAR PARA LA OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN

- Lavadora de raíces

La máquina consta de una tolva de admisión de raíces, de un árbol de transmisión de un cilindro o tambor ranurado, de una compuerta para retener las raíces y de una tanque de almacenamiento de raíces lavadas. Este equipo funciona por lotes de raíces y su capacidad es, aproximadamente, de 1000 kg de raíces por hora.

El tambor de la lavadora tiene un diámetro de 700 mm y una longitud de 1600 mm. Su velocidad de giro es de 40 rpm. En la superficie interior del cilindro se han soldado cuatro varillas de hierro de 12 mm de diámetro que forman una hélice; ésta induce un movimiento axial que facilita la carga, la agitación y el vaciado de las raíces.

- Ralladora

La máquina consta de una tolva, un chasis metálico, un árbol de transmisión y un rotor. Tiene una capacidad máxima de 1700 Kg de raíces frescas por hora.

La estructura cilíndrica del rotor consta de dos aros metálicos sobre los que se fijan con tornillos unas piezas de madera de forma trapezoidal; se construye así un tambor hueco de 280 mm de diámetro y de 400 mm de largo. El conjunto gira a una velocidad de 1800 rpm.

- Coladora

Esta está compuesta por un cilindro de extracción, un sistema de alimentación, la carcasa y una cuchara principal que en una posición extrema funciona como canaleta de carga y en la posición del extremo opuesto como canaleta de vaciado.

La coladora funciona por lotes y su capacidad es de 275 Kg de raíces frescas por hora. Esta capacidad es baja, comparada con la de la lavadora y la ralladora, por eso se suele instalar dos coladoras en paralelo.

El cilindro o tambor de la coladora tiene un diámetro exterior de 980 mm y una longitud de 870 mm. Su velocidad de rotación es de 25 rpm.

- Tamizado

Para filtrar la “lechada de almidón” y eliminar las fibras mas pequeñas se utiliza un tamiz plano que tiene un movimiento de vaivén. Debajo de el hay un tanque que recibe la lechada tamizada. El tanque tiene 300 mm de altura y sobre sus muros se fijan dos marcos con ángulo de 35 x 35 mm en forma de U invertida. Sobre estos marcos se fijan verticalmente cuatro segmentos de correa plana que sostiene un chasis en una ángulo ligeramente inclinado; sobre este chasis descansa el tamiz de 1200 mm de largo por 600 mm de ancho.

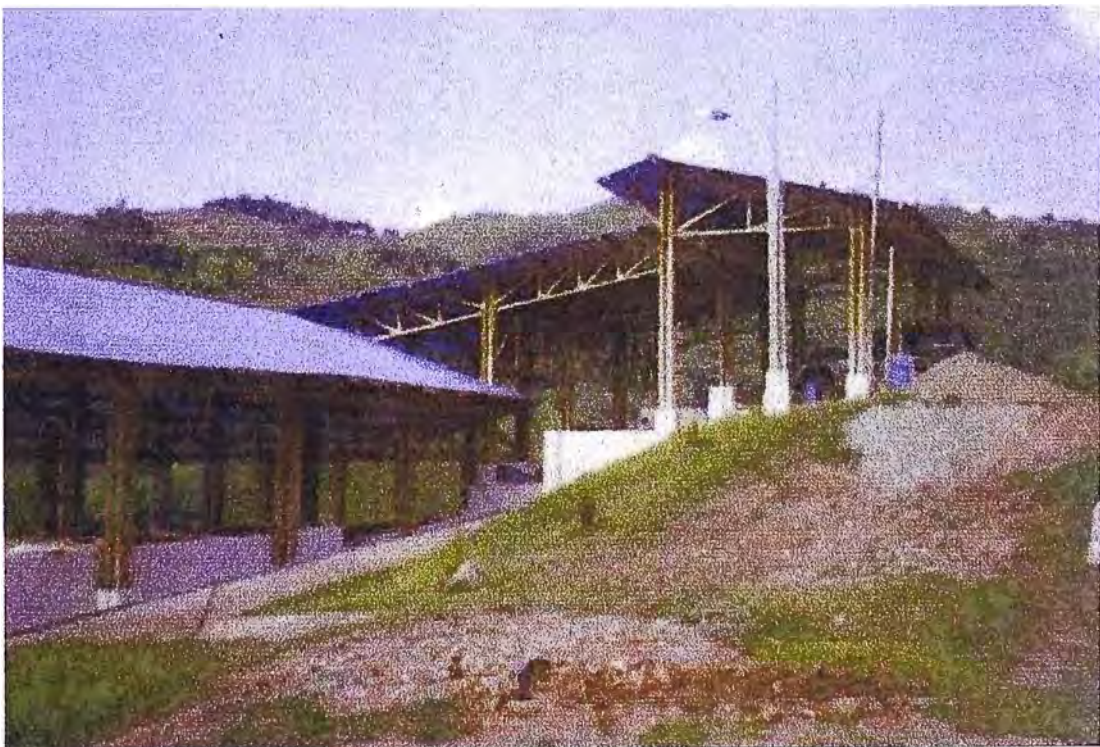
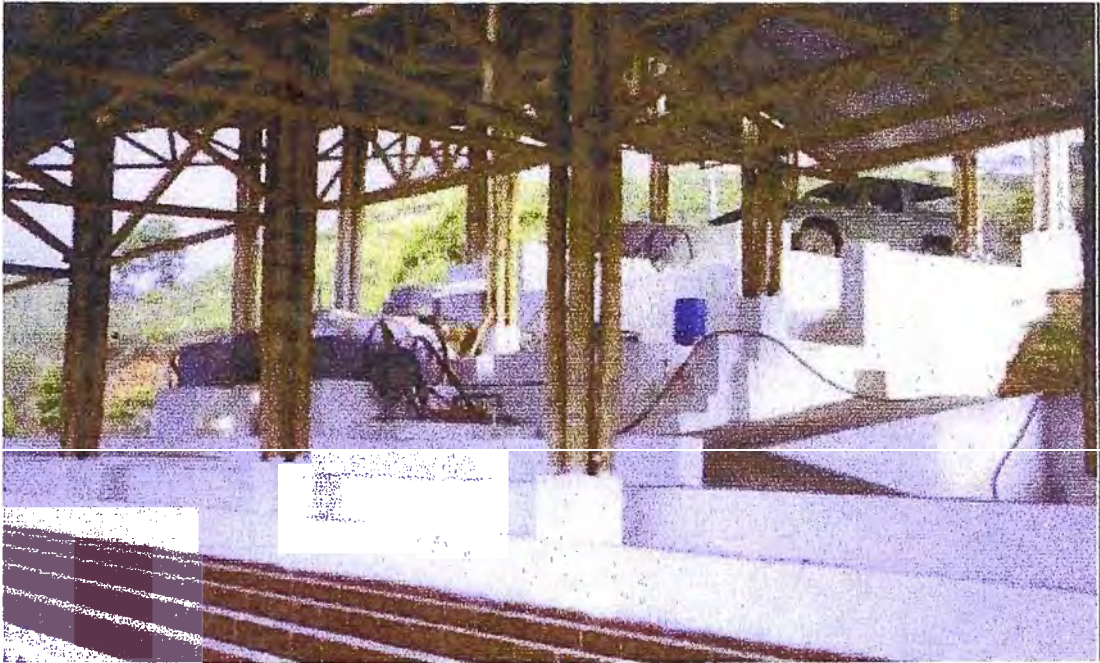
- Canales de Sedimentación

La sección transversal de estos canales tiene 600 mm de ancho por 400 mm de profundidad. El canal ideal para crear un flujo laminar y lograr una sedimentación homogénea seria rectilíneo de 180 m de largo; pero por razones de organización y de espacio se puede construir un laberinto o conjunto de siete canales paralelos, de 25 m de largo cada uno. Al inicio del primer canal, donde cae la lechada proveniente del tamiz, se construye un desarenador de mas o menos 1 m de longitud.

El objetivo de los canales es permitir la sedimentación del almidón solamente. Las impurezas pesadas, como la arena, quedan en el desarenador, y las livianas deben salir en las aguas residuales del canal.

2.- GRAFICOS DE LAS MAQUINAS Y EQUIPOS A USAR

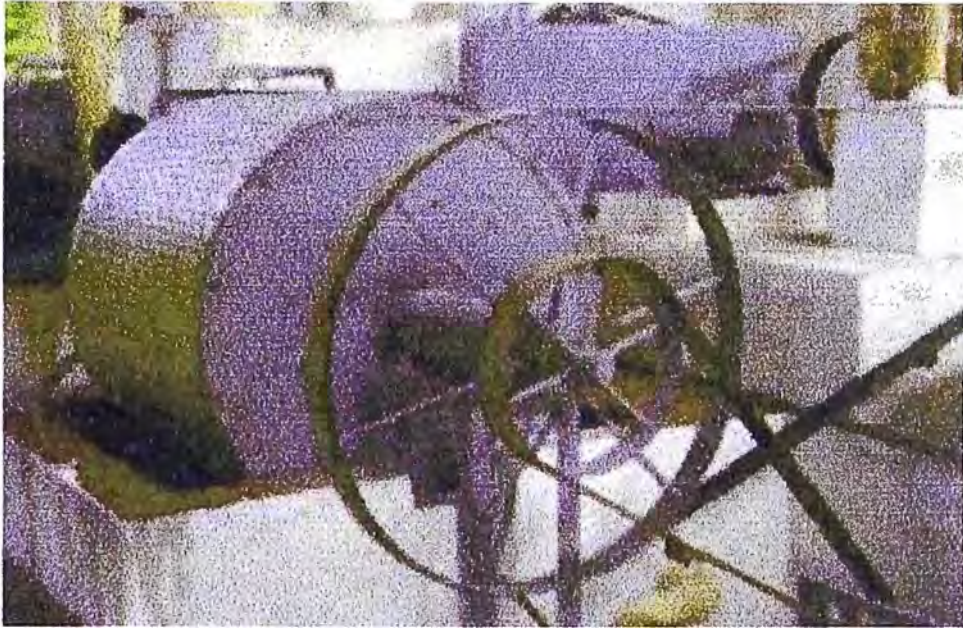
- **Vistas del exterior de una planta de almidón en Colombia**



- **Vistas de la Lavadora peladora**



- **Vista del Extractor**



- **Vistas del Sistema de Trasmisión**

