

Capítulo 3

Productos alimenticios

Existen diferentes productos elaborados a partir de la yuca que dependiendo de la región donde se cultive esta raíz constituyen productos autóctonos o típicos de cada población. Entre los más conocidos se encuentran *farinha*, raspa, tapioca, gari, casabe, almidón agrio de yuca, harina de yuca, pandeyuca, pandebono, enyucado, carimañolas, diabólicos, croquetas de yuca, bollo de yuca, bibingka de yuca, torta de yuca y croquetas de yuca.

EJEMPLOS DE ALIMENTOS TRADICIONALES

Farinha

Las raíces se limpian superficialmente y son ralladas, luego se envuelve esta masa en hojas y se le comprime con un instrumento adecuado, desde el tradicional tipití hasta filtro-prensas, que permitan retirar la mayor cantidad de líquido posible. Este material se mezcla con un poco de pulpa que se ha dejado fermentar durante tres días para darle mejor calidad. La pasta se amasa y se pasa por un cedazo obteniéndose una harina ligeramente húmeda. Después se coloca en un recipiente sobre un horno plano cubierto en su parte superior de losas de granito, con lo que se consigue un calor uniforme sin peligro de que se queme la pasta. Con una pala de madera, se da vueltas a la pulpa continuamente durante 3-4 horas de cocción, obteniéndose un producto granular y apenas tostado. Si se mantiene seca, la *farinha* puede conservarse indefinidamente. Constituye un excelente preparado que se consume generalmente como el arroz y es muy usada en Brasil, acompañado con otros alimentos, especialmente carne y salsa (Carrizales, 1991; Grace, 1997).

Raspa

Las raíces peladas se cortan en trozos grandes y se secan. El producto seco se muele, se tamiza y la harina conocida como *farinha* de raspa, se mezcla con la harina de trigo para la fabricación de pan, macarrones y galletas. Es un producto elaborado en Brasil (Grace, 1977).

Tapioca

Se obtiene del lavado de masa rallada de yuca, sobre un trapo, encima de un recipiente de madera, agitándose cada parte en aguas distintas hasta que se ha extraído casi todo el almidón. Los recipientes con la lechada de almidón se dejan aparte para que esta se asiente. Después de algún tiempo se decanta el agua y se extiende el almidón al sol en esteras de caña, en las que se seca durante dos días, obteniéndose la harina de tapioca. Este producto se usa en Brasil para hacer tortas (Grace, 1977).

Gari

En áreas rurales, las raíces son peladas, ralladas y la pulpa se pone en un gran saco de tela y se deja al sol para escurrir y fermentar comprimida por pesos que se colocan sobre esta (piedras o maderos). Cuando la pulpa está suficientemente seca, se retira del saco para un secado final; esta se tuesta o fríe (a menudo con aceite de palma) hasta que se seca y se muele obteniéndose el producto en forma de harina gruesa. En el proceso de fermentación la masa se semidextriniza por acción del calor, se libera el ácido cianhídrico a bajo pH por hidrólisis espontánea del glucósido cianogénico de la yuca y se desarrolla el sabor característico del *gari*. En la primera etapa del proceso, se

producen ácidos láctico y fórmico por acción bacteriana sobre el almidón y finalmente a más bajo pH es atacado por un hongo que aumenta la acidificación y produce el aroma característico. Este alimento es popular entre los grupos de bajos ingresos de África occidental (Grace, 1977).

Harina de yuca industrial

La harina de yuca es obtenida por el proceso de molienda y tamizado de trozos secos de yuca. Las raíces de yuca son lavadas para retirar las impurezas y la cascarilla y son troceadas en una picadora. Los trozos son secados al sol o artificialmente y una vez secos son molidos y tamizados para obtener la harina.

La harina de yuca es usada para el consumo humano en la industria de la panificación, en la preparación de harinas compuestas trigo – yuca para la elaboración de pan y galletas, fideos y macarrones, como relleno para carnes procesados; como espesante de sopas deshidratadas, condimentos, papillas y dulce de leche y para la elaboración de harinas precocidas y mezclas instantáneas (Fernández *et al.*, 1992).

Almidón agrio de yuca

La obtención de almidón agrio o fermentado de yuca tiene las mismas etapas de producción del almidón nativo, con la diferencia de que incluye una etapa de fermentación previa al secado. Las raíces de yuca son lavadas para eliminar tierra e impurezas y retirar la cascarilla. Luego, son ralladas para liberar los gránulos de almidón y la masa obtenida es lavada y filtrada o colada en una tela y la lechada es decantada en canales. El almidón precipitado es traspasado a tanques donde fermenta en forma natural, en condiciones anaeróbicas, por aproximadamente 30 días y luego es secado al sol, lo que le da a este almidón propiedades de expansión en el horneado. El almidón agrio adquiere, además, características especiales de sabor, textura y olor que son deseables en la panificación. Se emplea en la elaboración de productos horneados como pandebono, pandeyuca y bocadillos tales como «rosquillas» y «besitos». Este almidón es tradicional en Brasil y Colombia (Alarcón y Dufour, 1998).

PANES Y TORTAS

Casabe

Las raíces son lavadas, se les quita la corteza y luego son ralladas. A la masa rallada se le extrae parte de la humedad colocándola en el interior de un cesto cilíndrico, alargado y angosto fabricado en palma (*bordoncillo*) llamado *tipiti* o *sebucán*, el cual es suspendido y comprimido al estirarse bajo la acción del peso de piedras amarradas a su extremidad o bien al de una persona que coloca transversalmente un madero y se sienta sobre el mismo; al extenderse, el sebucán va exprimiendo el jugo amargo blanquecino, denominado *yare* que contiene gran porcentaje de ácido cianhídrico. De dicho jugo se extrae el almidón por simple decantación y evaporación. Luego, la masa relativamente seca es extraída del sebucán y es cernida mediante un tamiz con el objeto de separar la parte fibrosa que es empleada en la alimentación del ganado porcino; la parte fina es depositada en cestones.

La harina semiseca y cernida se extiende sobre una plancha caliente circular de aproximadamente 50 cm de diámetro, generalmente calentada con leña, La harina es calentada hasta que adquiere un ligero color oscuro por un lado, formando una torta sólida delgada. En este proceso la torta va perdiendo humedad y eliminando el ácido cianhídrico. Luego se da la vuelta a la torta ya formada para añadirle otra porción de harina para hacer *la cara del casabe* puliendo su superficie. Las tortas se extienden sobre armazones de caña para terminar de secarlas bajo la acción del sol o cerca de los fogones donde son preparadas de modo que permita captar calor proveniente del fuego; de esta forma se logra que la torta quede parcialmente tostada y crocante quedando listas para ser consumidas.

El casabe es de textura dura y tiene un sabor excelente; generalmente se consume después de humedecerlo en una salsa. Este producto es muy común en las islas del Caribe, Colombia y Venezuela (Torrico, 1976; FAO, 1991).

Pandeyuca

Para su preparación se mezclan 500 g almidón de yuca agrio o fermentado de yuca con 250 g de queso rallado, se adicionan dos huevos, una cucharada de mantequilla y una cucharadita de polvo de hornear; se mezclan los ingredientes y se hacen los panes en la forma que se deseen, generalmente en forma de media luna, se colocan en el horno a 200 °C y se dejan dorar. Este producto es muy popular en Colombia (CIAT, 1982).

Pandebono

Se mezclan 250 g de almidón agrio de yuca con 500 g de queso rallado, 100 g de harina de maíz y luego se adicionan lentamente 125 mL de leche, 50 g de mantequilla y 30 g de azúcar formando una masa o pasta suave y consistente. Después se forman bolas o rosquillas, se colocan en un molde y se llevan a un horno precalentado a 180 °C por 15 minutos hasta que los panes obtengan un color dorado. Este producto es muy consumido en Colombia (CIAT, 1982).

Enyucado

La yuca cruda es rallada y se le adiciona mantequilla, azúcar, natas de leche y se mezcla bien. Aparte, se ralla un coco y se le agrega agua, la cual ha sido hervida previamente con anís. Se mezclan todos los ingredientes para formar una pasta muy suave. La mezcla se vierte en un molde engrasado con mantequilla, se coloca al horno a fuego moderado por media hora o hasta que dore. Puede adicionarse dulce de guayaba como cubierta (CIAT, 1982).

Carimañolas

La yuca es pelada, cocida y molida. Luego se amasa muy bien con sal al gusto y se toman porciones del tamaño de un huevo, se presiona con el dedo pulgar en el centro y se pone dentro de ellas el relleno de carne, se cierran y se ponen a freír en aceite bien caliente hasta que se doren (se pueden rellenar también con queso rallado, con pollo o pescado desmenuzado). A las masas formadas se les puede agregar un poco de masa de maíz para evitar que al freír queden demasiado embebidas en aceite (CIAT, 1982).

Diabolines

Se mezclan almidón de yuca, queso rallado, huevos y agua con sal y se forman bolitas que se meten a un horno a 190 °C hasta que doren en 15-20 minutos (CIAT, 1982).

Bollo de yuca

La yuca se pela y se cocina unos 20 minutos de modo que no quede muy blanda. Luego se muele con uno por ciento de sal y se amasa, se envuelve en hojas de maíz formando el bollo, se amarran y se ponen a cocinar en agua por media hora (CIAT, 1982).

Bibingka de yuca

La yuca se pela y se ralla. Se baten huevos y se agregan azúcar, mantequilla y sal, y se mezclan bien. Luego, se adiciona la yuca rallada y la leche de un coco mezclando bien. Se coloca la masa en el horno a 190 °C en un molde forrado con hojas de plátano. Poco antes de terminar la cocción, se cubre con coco rallado y se esparce queso rallado o en tiras. Luego se coloca en el horno hasta que dore (CIAT, 1982).

Torta de harina de yuca

Harina de yuca y harina de trigo son mezcladas en igual proporción. Luego se adicionan huevos, mantequilla y queso molido y se mezcla muy bien. Se engrasa un molde, se espolvorea con harina de trigo y se vierte sobre este la mezcla anterior. Se lleva a un horno precalentado a 180 °C durante 45 minutos (CIAT, 1982).

Croquetas de yuca

La yuca es cocinada en agua hasta que esté blanda. Luego es molida y se le adiciona un poco de sal. La masa es formada en un embudidor, en forma de astillas y luego son prefritas en aceite durante un minuto a una temperatura entre 170-180 °C. Después, las croquetas se dejan enfriar hasta que adquieren la temperatura del ambiente. Enseguida se someten a una congelación rápida a a -30 °C por 24 horas, al final de las cuales pueden ser freídas en aceite durante 2-3 minutos a una temperatura de 170 °C (Sánchez y Alonso, 2002).

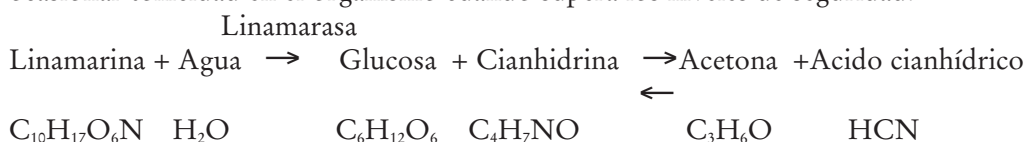
TOXICIDAD Y LIBERACIÓN DE ÁCIDO CIANHÍDRICO DE LA YUCA

Las variedades de yuca se clasifican en dulces o amargas, según el bajo o alto contenido de cianuro en las raíces. El cianuro en las raíces y en los tejidos de la planta de yuca se encuentra en dos formas: cianuro libre y cianuro ligado o combinado. Tanto la raíz como el follaje de yuca contienen cantidades variables de cianuro.

Compuestos tóxicos

El cianuro está constituido por dos tipos de glucósidos cianogénicos: linamarina y lotaustralina. Aproximadamente el 85-90 por ciento del cianuro total de los tejidos en la yuca se encuentra como cianuro ligado o linamarina y solo el 10-15 por ciento como cianuro libre o lotaustralina (Gómez, 1982).

Los glucósidos linamarina y lotaustralina al hidrolizarse por medio de la acción de la enzima linamarasa, dan origen a glucosa y cianhidrina, donde esta última se descompone en acetona y ácido cianhídrico libre gaseoso; este último es el que puede ocasionar toxicidad en el organismo cuando supera los niveles de seguridad.



Estos compuestos también son considerados responsables de la repelencia que las plantas ejercen sobre algunos insectos fitófagos o herbívoros en general. Lo mismo sucede en variedades con altos contenidos de estos glucósidos en lo que respecta a la tolerancia a ciertas enfermedades.

El nivel de glucósidos cianogénicos o ácido cianhídrico total presente en la raíz o follaje de yuca, determina la diferencia entre variedades amargas (de mayor toxicidad) y variedades dulces. Según las experiencias del CIAT en manejo de variedades de yuca (Sánchez, 2004), las variedades con menos de 180 ppm de HCN (en base seca) se clasifican como *variedades dulces*, las que poseen entre 180-300 ppm se clasifican en el rango *intermedio* y las que tienen un contenido de HCN mayor de 300 ppm son consideradas como *variedades amargas*. El contenido cianogénico de los distintos tejidos de una planta de yuca es considerablemente afectado por las condiciones edafoclimáticas del ambiente en que crece y por su edad al momento de la cosecha. Las raíces de un determinado cultivar pueden ser dulces cuando son producidas en un ambiente o más amargas en otros sitios. Sin embargo el contenido cianogénico de las variedades amargas, tiende a ser consistentemente mayor, hasta 1 000 mg de HCN por kilo de raíces frescas, que el de las variedades dulces, 20 mg de HCN por kilo de raíces frescas. No se conocen variedades de yuca que carezcan de cianógenos (Ceballos y De la Cruz, 2002).

El ácido cianhídrico se halla en mayor concentración en la corteza de la raíz -cáscara que se encuentra debajo de la cascarilla- que en la pulpa y es mayor en la periferia de esta que en el centro de la misma. La concentración de cianuro en las hojas varía, siendo mayor en las hojas tiernas o jóvenes que en las hojas adultas y, en general, las hojas poseen concentraciones similares a las encontradas en la cáscara de las raíces. En las variedades dulces, la mayor proporción de ácido cianhídrico se encuentra en la corteza, mientras que en las variedades amargas este se distribuye más uniformemente en la corteza y en la pulpa. No existen estudios que demuestren una relación entre la morfología de la yuca y su contenido de glucósido cianogénico.

Liberación de HCN

El cianuro ligado o linamarina libera ácido cianhídrico al tratarla con ácidos diluidos. En forma natural, la liberación del HCN se debe a la acción de la enzima linamarasa, la cual se encuentra normalmente en los tejidos de la planta de yuca, especialmente en la cáscara de la raíz y en las hojas. El contacto de la enzima con la linamarina ocurre cuando los tejidos sufren daños mecánicos o por trituración o destrucción de la estructura celular de la planta o tejidos. Por lo tanto, cuanto mayor sea la trituración más fácil es la liberación del HCN en la yuca; además, la temperatura y la humedad aceleran el proceso de liberación del HCN. Al picarse las raíces, la proporción de cianuro libre aumenta rápidamente a rangos de 30-40 por ciento del cianuro total comparado con los niveles de 10-15 por ciento de cianuro libre observados en la cáscara o en la pulpa cuando se analizan por separado.

Para almidones y harinas de yuca usadas como alimento la Comisión Conjunta FAO-OMS de Normalización de Alimentos, estableció como criterio un límite máximo de 10 mg/kg de HCN. Además, la conferencia conjunta de expertos en aditivos alimentarios de la FAO y de la OMS, consideró que no era posible estimar la cantidad de glucósido cianógeno que puede ser ingerida sin riesgo para la salud ya que se carece de una determinación cuantitativa de la toxicidad y no se dispone de información epidemiológica se llegó a la conclusión de que si la cantidad de HCN es inferior a 10 mg/kg no se puede establecer relación con la toxicidad aguda (FAO y OMS, 1991).

Salvo algunas excepciones, especialmente cuando los niveles de cianuro iniciales son relativamente altos y el tiempo de secado es corto, el cianuro residual en el producto seco puede ser superior a 100 ppm. Las raíces que presentan un alto contenido de este compuesto retienen suficiente cantidad después de la cocción lo que perjudica el sabor del alimento y aumenta la toxicidad.

El método comercial más efectivo para eliminar total o parcialmente el HCN, se basa en la acción controlada del calor. Temperaturas entre 40-80 °C son efectivas para eliminar la mayor parte del ácido cianhídrico libre. La liberación del HCN puede ocurrir por deshidratación natural por acción de los rayos solares, a temperatura entre 30-40 °C el cual es un sistema seguro para destruir el ácido cianhídrico, sin afectar la acción de la enzima linamarasa. Por otro parte, el secado artificial en secadores con circulación forzada con aire caliente a temperatura de 60 °C produce una eficiente eliminación del cianuro de los trozos frescos. Normalmente, los trozos de yuca secados al sol contienen niveles de cianuro menores a los obtenidos con secado artificial. Los trozos de yuca secados al sol suelen tener niveles de cianuro residual menores a 100 ppm y la mayor parte es cianuro libre, el cual suele volatilizarse fácilmente; en cambio la mayor proporción del cianuro residual en trozos secados artificialmente se encuentra aún como cianuro ligado (Gómez *et al.*, 1979).

Usando temperaturas no inferiores a 40 °C es posible eliminar hasta cerca del 80 por ciento del ácido cianhídrico libre y cuando la temperatura llega a 60 °C se puede eliminar más del 90 por ciento. El calentamiento a temperaturas mayores de 70 °C, con poca o ninguna humedad, elimina el ácido cianhídrico libre; sin embargo, con este método también se destruye la enzima linamarasa que es la enzima que permite

que los glucósidos continúen transformándose en ácido cianhídrico libre. El rango de temperatura óptimo para realizar la máxima liberación del HCN está comprendido entre 60-70 °C. Cooke y Maduagwu (1978) demostraron que los procesos de secamiento lentos a baja temperatura remueven el cianuro residual de manera más efectiva que los procesos rápidos a alta temperatura.

El proceso de cocción en agua es efectivo para eliminar el HCN libre y es posible eliminar más del 90 por ciento de este cocinando la yuca durante 15 minutos. El cianuro libre es mucho más fácil de eliminar que el cianuro ligado. Si se sumergen los trozos de yuca en agua fría antes del proceso de cocción, se puede eliminar la mayor parte del HCN libre después de 4-5 horas, es decir el 10-15 por ciento del HCN total de la yuca. Sin embargo, con este método el HCN ligado (85-90 por ciento del HCN total) permanece casi intacto y es por ello que es necesario someter la yuca a mayores temperaturas.

El proceso de ensilaje de los trozos de yuca permite una rápida y total conversión del cianuro ligado a cianuro libre en prácticamente 4-7 días del inicio del proceso, al final del cual la biomasa ensilada posee un 30 por ciento del cianuro total inicial presente como cianuro libre que es el más volátil.

En resumen, los procesos normales a los cuales son sometidas las raíces de yuca para la alimentación animal, secado o ensilaje o para la alimentación humana por medio de la acción controlada del calor; constituyen medios eficientes para reducir la cantidad de cianuro a niveles inocuos.

Envenenamiento con ácido cianhídrico

La ingestión de grandes cantidades de yuca con alto contenido de cianógeno, en forma cruda o mal procesada, puede causar envenenamiento fatal; la dosis letal mínima de ácido cianhídrico en los seres humanos es de 60 ppm. Aunque la intoxicación aguda por ácido cianhídrico es poco frecuente, el consumo prolongado de pequeños niveles del tóxico pueden originar problemas nutricionales y fisiológicos serios. La mayoría de los síntomas de intoxicación se pueden asociar con la afinidad del ácido cianhídrico con iones metálicos como el hierro y el cobre. El ion cianuro reacciona con el ion hierro de la hemoglobina y forma cianohemoglobina, lo que imposibilita el transporte del oxígeno en la sangre. Asimismo, el ion cianuro puede formar complejos con algunas enzimas que tiene iones cobre como el citocromo-oxidasa, afectando ciertas reacciones del metabolismo, que pueden ocasionar depresión en los centros medulares, originando dificultades respiratorias y efectos tóxicos protoplasmáticos que pueden producir la muerte en casos extremos de intoxicación (Buitrago, 1990).

Por otra parte, en las poblaciones con altos índices de desnutrición se pueden presentar problemas de deficiencia de proteínas como el Kwashiorkor o enfermedades neurológicas como el Konzo. Se ha encontrado que cuando una enfermedad crónica ha estado asociada con el consumo de yuca, las víctimas han padecido también de una deficiencia proteínica; esto sugiere que hay una relación entre el envenenamiento por yuca y la deficiencia de proteína. Con la ayuda de la enzima rodanasa, el cuerpo humano detoxifica el cianuro mediante la formación de tiocianato, el cual es eliminado por medio de la orina; es el producto de la reacción entre el azufre orgánico de la proteína alimenticia y el cianuro libre de la yuca.

Cuando hay una exposición constante a los cianógenos de la yuca, la mayor síntesis de rodanasa impone una demanda adicional de aminoácidos de las reservas del cuerpo. Para detoxificar un mg de HCN, el cuerpo necesita el suministro diario de cerca de 1,2 mg de azufre alimenticio proveniente de aminoácidos que contengan azufre. Si se consume regularmente yuca, las demandas de rodanasa y de los aminoácidos con azufre se agotan, y si la dieta es inadecuada, se puede perjudicar la síntesis de muchas proteínas vitales para funciones corporales, especialmente las del sistema nervioso central, dando como resultado el desarrollo de enfermedades de deficiencia proteínica. Con el tiempo,

la pérdida de azufre de este sistema desencadena una parálisis súbita e irreversible (Padmaja, 1995).

Cuando se comparan los contenidos proteínicos del arroz, el trigo y la yuca, esta última queda evidentemente rezagada. Un adulto que consuma un kilo de yuca tiene que ingerir 52 g de proteína de otras fuentes para obtener la ingesta diaria recomendada de 65 g. Por el contrario, en promedio, un kilo de trigo proporciona 121 g de proteína y uno de arroz 64 g. En conclusión, si el consumo de proteína es superior al adecuado, tanto para los requerimientos metabólicos generales como para la eliminación del cianuro de productos derivados de la yuca, los efectos tóxicos se reducen.

Capítulo 4

Deterioro poscosecha y conservación de las raíces de yuca

Una de las mayores limitaciones para aumentar el consumo de yuca en la alimentación es la dificultad de conservar las raíces después de la cosecha. Las raíces de yuca se deterioran rápidamente, sufriendo dos tipos de deterioro, uno fisiológico y otro microbiano, volviéndose inaceptables para el consumo humano o para otros usos. El deterioro aumenta los costos y riesgos y causa pérdidas considerables a productores de yuca y a los comerciantes mayoristas y minoristas; esto origina un alto margen de comercialización para compensar el volumen apreciable de raíces que se pierden.

El deterioro fisiológico necesita oxígeno para su desarrollo e involucra reacciones enzimáticas; se puede evitar impidiendo el acceso de oxígeno a los tejidos parenquimatosos o inhibiendo las reacciones enzimáticas. El deterioro microbiano está asociado a la actividad de microorganismos patógenos y es propiciado por ambientes de humedad relativa y temperaturas altas, especialmente con daños físicos.

El deterioro poscosecha puede ser prevenido con el uso de buenas prácticas de cosecha que eviten los daños ya que las raíces sanas permanecen sin deteriorarse durante un tiempo considerablemente más largo en comparación con las raíces heridas o golpeadas; también es posible usar agentes antimicrobianos inocuos para el hombre y que no dejen residuos en los tejidos del parénquima de la raíz.

El conocimiento de los mecanismos responsables del deterioro poscosecha de las raíces de yuca ha permitido aplicar varios principios en el diseño de sistemas de almacenamiento y conservación, mediante tratamientos en pre y poscosecha con el fin de prevenir o eliminar el deterioro.

DETERIORO FISIOLÓGICO Y MICROBIANO

El deterioro fisiológico o primario se inicia durante las primeras 48 horas después de la cosecha y su sintomatología consiste básicamente en una desecación de color blanco a café, que normalmente aparece en forma de anillo en la periferia de la pulpa, la cual se observa en cortes transversales de la raíz (Lámina 12 a). Además, se presentan zonas con estrías azul-negras, constituidas por vasos del xilema deteriorados, las cuales se pueden observar fácilmente en cortes longitudinales de las raíces afectadas (Lámina 12 b). El deterioro fisiológico se inicia rápidamente en las heridas, que casi siempre ocurren en los extremos distal y proximal de la raíz durante la cosecha.

La coloración típica del deterioro fisiológico se debe a la presencia de pigmentos de taninos, cuya formación está relacionada con la presencia en los tejidos de un compuesto fenólico llamado escopoletina. Dicho compuesto generalmente no se encuentra en las raíces frescas o, si lo hay, está en muy bajas concentraciones; sin embargo, a las pocas horas de la cosecha su concentración aumenta considerablemente. Esta se puede detectar en las raíces antes de que se presenten

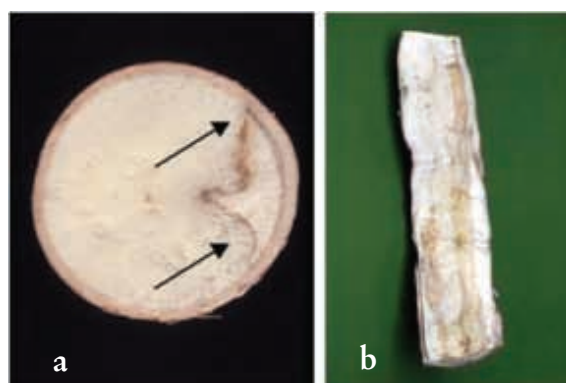


Lámina 12
Deterioro fisiológico en raíces de yuca
 a. Desecación de color blanco a café
 b. Estrías azul-negras



WHEATLEY (1991)

Lámina 13*Deterioro microbiano en raíces de yuca**a. Estriado vascular.**b. Pudrición húmeda.*

los síntomas típicos de deterioro exponiendo las raíces a luz ultravioleta; en presencia de esta luz la escopoletina emite una fluorescencia de color azul intenso, lo cual indica que el proceso de deterioro ha comenzado (Wheatley, 1983).

El deterioro microbiano o secundario ocurre después del deterioro fisiológico y consiste en pudriciones causadas por hongos y bacterias, patógenos de las heridas. Por lo general se presenta en cualquier parte de la raíz después de 5-7 días de realizada la cosecha y depende de la intensidad de los daños físicos ocasionados a las raíces en el momento de la cosecha y de la capacidad de la flora microbiana del suelo y del medio ambiente para metabolizar el almidón de las raíces. El

síntoma inicial del deterioro microbiano es un estriado vascular semejante al observado en tejidos con deterioro fisiológico (Lámina 13 a), pero posteriormente se transforma en una pudrición húmeda con fermentación y maceración de los tejidos (Lámina 13 b).

FACTORES QUE INCIDEN EN EL DETERIORO POSCOSECHA DE YUCA

Las investigaciones realizadas en el CIAT han permitido definir que los factores más importantes en la incidencia de ambos tipos de deterioro de la yuca son los daños mecánicos, las diferencias entre variedades, las condiciones edafoclimáticas y la poda de la parte aérea de la planta (Wheatley, 1983).

Daños mecánicos

El comienzo y la intensidad del deterioro de las raíces están estrechamente relacionados con la presencia de daños mecánicos, los cuales normalmente ocurren en el momento de la cosecha. Por lo general, los primeros síntomas de deterioro se presentan debajo de las áreas donde se ha dañado o perdido la cáscara o en los extremos distal o proximal de las raíces, que son las zonas más propensas a sufrir daños físicos. La ocurrencia de daños mecánicos en las raíces es afectada por factores relacionados con las características varietales tales como la forma de las raíces; presencia de pedúnculos largos, adherencia de la cáscara, textura y grado de compactación del suelo y del método de cosecha manual o mecánico. Una práctica que permite reducir los daños causados por el deterioro asociado con los daños mecánicos, consiste en someter las raíces a un proceso de curado para tratar de sanar las heridas ocasionadas durante la cosecha e impedir así que sean atacadas por microorganismos.

Diferencias varietales

Se han determinado diferencias en la susceptibilidad al deterioro fisiológico entre distintas variedades de yuca y a la vez en una misma variedad. Existe una correlación positiva entre el contenido de materia seca de las raíces y el grado de deterioro fisiológico.

Condiciones edafoclimáticas

La susceptibilidad al deterioro de un cultivar es significativamente diferente dependiendo del lugar en el que se cultive. El comportamiento de un mismo cultivar al deterioro puede variar en el transcurso del año en un mismo sitio, posiblemente como consecuencia de los cambios climáticos. Los cultivares más resistentes al deterioro fisiológico de las raíces son aquellos que son más afectados por las condiciones adversas

de la zona tales como sequías, enfermedades e insectos. Las plantas que presentan los niveles más altos de defoliación y un bajo contenido de almidón en las raíces son las más resistentes.

Poda de la parte aérea de la planta

El nivel de deterioro fisiológico en poscosecha se reduce con la poda de la parte aérea de las plantas a 14-21 días antes de la cosecha. El efecto de poda se ha estudiado en raíces adheridas al tallo y en raíces desprendidas al momento de la cosecha; a medida que aumenta el tiempo transcurrido entre la poda y la cosecha, el deterioro fisiológico disminuye en ambos casos. Cuando el período entre la poda y la cosecha es de 1-2 semanas, las raíces adheridas al tallo se deterioran menos que las raíces sueltas; y cuando el período es de tres semanas las raíces almacenadas, en una u otra forma, son resistentes al deterioro. Los rebrotes en los tallos después de la poda no afectan su efecto en la disminución del deterioro; plantas cosechadas después de cinco meses de realizada la poda presentan resistencia al deterioro. Sin embargo, las podas y rebrotes sucesivos reducen el contenido de almidón y afectan la textura y calidad culinaria de las raíces.

TÉCNICAS DE CURADO Y CONSERVACIÓN DE YUCA

Hasta el momento no existe una técnica universal para conservar y almacenar raíces de yuca a nivel comercial. Según su duración hay tres tipos de conservación de raíces: a corto, mediano y largo plazo y según su duración existen diferentes técnicas de conservación.

El almacenamiento a *corto plazo* (7-10 días) facilita el mercadeo disminuyendo las pérdidas por deterioro luego de la cosecha de las raíces. En este caso, las técnicas de conservación usadas son los *silos de tierra* y *bolsas de polietileno*. Estas técnicas consisten en someter las raíces a temperaturas y humedades relativamente altas; condiciones en las cuales se ha observado que las heridas sanan rápidamente. Estos tratamientos estimulan la suberificación -formación de corteza- de las células exteriores próximas a las heridas y, posteriormente, la formación de súber a partir de algunas células parenquimatosas profundas que se multiplican y forman una nueva hilera de células de consistencia corchosa. Cuando la humedad relativa oscila entre 80-85 por ciento y la temperatura entre 25-40 °C, la suberificación ocurre entre el primer y cuarto día y el nuevo súber se forma después de 3-5 días. Estas técnicas no son apropiadas para almacenar grandes cantidades de yuca y mucho menos durante períodos prolongados.

Silos de tierra

Esta técnica de conservación es similar a la usada para conservar las papas en la cual estas son enterradas luego de su cosecha con el objeto de simular las condiciones en las cuales está el cultivo en el campo. El silo se debe construir en un terreno seco y nivelado, sobre el cual se hace un lecho circular de paja u hojas secas de caña o pasto. Las raíces frescas se amontonan sobre este lecho formando una pila piramidal, que se cubre con una capa de paja similar a la utilizada en la base. Finalmente, se recubre con tierra y se le hacen orificios de entrada y salida de aire (Booth, 1977). El silo de tierra permite mantener una alta humedad ambiental y, en condiciones adecuadas, las raíces se pueden curar por formación de súber que cicatriza las heridas ocasionadas durante la cosecha y el transporte de las raíces.

En los silos de tierra se podrían conservar las raíces de yuca hasta tres meses, pero al final las raíces tendrían una ligera disminución en el contenido de almidón y un aumento proporcional de azúcares. La curación y el tiempo de almacenamiento dependen del diseño del silo y de las condiciones predominantes en la región: temperatura y humedad relativa durante el período de almacenamiento. En períodos frescos y húmedos los resultados pueden ser satisfactorios pero durante períodos secos

y calientes en los cuales la temperatura puede subir rápidamente y mantenerse a más de 40 °C se puede perder casi todo el producto.

Bolsas de polietileno

En esta técnica las raíces de yuca se empacan en bolsas de polietileno las cuales se deben sellar para obtener las condiciones adecuadas para la curación. Las raíces empacadas en bolsas de polietileno con capacidad de hasta 20 kg se pueden almacenar hasta por una semana con pérdidas mínimas; luego de 7-10 días de almacenamiento se presenta deterioro microbiano. Una manera de disminuir la incidencia de hongos y bacterias, y por consiguiente el deterioro microbiano, es hacerle perforaciones a las bolsas para reducir la humedad interior y adicionalmente realizar un tratamiento con fungicidas.

Para el buen éxito de esta técnica de conservación se deben controlar algunas variables como:

- el *nivel del daño mecánico* que presentan las raíces a tratar, descartando las raíces dañadas, podridas o muy pequeñas;
- el *tiempo entre la cosecha y el almacenamiento* debe ser lo más corto posible, máximo 2-3 horas después de la cosecha;
- la *posibilidad de la curación de las heridas* de las raíces en las condiciones de almacenamiento, garantizando una humedad aproximada de 35 °C y una humedad relativa de 85-90 por ciento;
- la *capacidad de las bolsas que se utilicen*: cuanto mayor sea la cantidad de raíces por bolsa mayores son los problemas de deterioro microbiano;
- las *perforaciones en las bolsas* son convenientes para evitar que la humedad interna pueda llegar a 100 por ciento y favorezca las condiciones para el desarrollo de bacterias y hongos;
- el *tratamiento de las raíces con fungicidas* es indispensable si se quiere almacenar raíces por un período superior a dos semanas; se usa una solución de tiabendazol al 0,004 por ciento.

Teniendo en cuenta las variables mencionadas para la aplicación de esta técnica, las raíces de yuca se deben seleccionar antes de tratarlas y empacarlas, se lavan con agua y posteriormente se sumergen en la solución de tiabendazol durante cinco minutos. Luego las raíces se dejan secar al aire libre bajo sombra durante media hora; posteriormente se empacan en las bolsas plásticas y se cierran doblando dos o tres veces su boca y sellando el doblez con una grapadora, finalmente las bolsas se perforan. Cuando las raíces se manipulan con cuidado durante todo el proceso de tratamiento se pueden lograr almacenamientos exitosos de 2-4 semanas de duración. Sin embargo, en períodos de almacenamiento superiores a tres semanas, se puede presentar hidrólisis del almidón a azúcares lo cual genera en las raíces un sabor dulce (Wheatley, 1983).

El almacenamiento a *mediano plazo* (2-4 semanas) permite curar las heridas de las raíces y así eliminar el deterioro fisiológico y microbiano. Como ejemplo de este almacenamiento, están las técnicas de conservación en *cajas de madera con aserrín, emparafinado y encerado* de raíces de yuca.

Cajas de madera con aserrín

En esta técnica de conservación las raíces de yuca se empacan en cajas de madera de 50 cm de largo, 29 cm de ancho y 30 cm de alto conteniendo aserrín con una humedad del 50 por ciento para favorecer la curación de las heridas y evitar la pérdida excesiva de humedad de las raíces. Se debe tener cuidado de controlar la humedad del aserrín ya que cuando se usa demasiado seco no se curan las raíces y el deterioro fisiológico se acelera; si se usa demasiado húmedo se presenta un desarrollo excesivo de las raíces secundarias y ocurren pudriciones severas. Las cajas se sellan con una tapa de madera, se almacenan bajo sombra o a campo abierto y se cubren con tela impermeable. Uno de los principales inconvenientes de esta técnica es el uso de aserrín el cual es un material

hospedante de insectos y hongos. Esta técnica de conservación ha sido poco usada en la práctica, pero según estudios realizados de almacenamiento de raíces en estas cajas aproximadamente un 75 por ciento de las raíces conservan una calidad aceptable después de cuatro semanas; sin embargo, la demora de un día entre la cosecha y el almacenamiento reduce esta proporción hasta un 49 por ciento (Wheatley, 1983).

Emparafinado

Para la aplicación de esta técnica se deben usar raíces en óptimo estado, perfectamente sanas, libres de cortes y magulladuras y que sean de calidad aceptable para los consumidores. Para garantizar su efectividad debe aplicarse dentro de las 24 horas posteriores a la cosecha. El proceso se inicia desde la cosecha, seleccionando las raíces más adecuadas, evitando cualquier deterioro en su transporte. Las raíces son lavadas con agua para eliminar totalmente la tierra adherida; esta operación es indispensable para lograr una buena adherencia de la parafina. Luego del lavado, es conveniente realizar una desinfección de las raíces sumergiéndolas por tres minutos en una solución de tiabendazol al 0,001 por ciento. Posteriormente, son secadas al aire en lugar sombreado o utilizando secadores de aire o ventiladores para acelerar el secado y garantizar una adecuada adherencia de la parafina a las raíces. Las raíces secas se sumergen en un recipiente con parafina derretida a una temperatura entre 140-160 °C. Generalmente, la técnica de parafinado es manual; primero se introduce en el recipiente la mitad de la raíz hasta tres segundos, se espera que la película de parafina se enfríe sobre ella y se parafina luego la otra mitad. También se pueden usar canastillas similares a las utilizadas para inmersión en productos fritos. Esta operación es crítica, ya que la mala aplicación de la parafina, por exceso o por defecto, ya sea de tiempo o de temperatura, no solo invalida el proceso sino que puede aún acelerar el deterioro de las raíces. Inmediatamente después de sacar las raíces de la parafina se dejan secar en lugar sombreado o si se prefiere se pueden sumergir en agua fría con el fin de solidificar la parafina y refrigerar las raíces. El tiempo normal de conservación de las raíces parafinadas oscila entre 20-30 días (IIT, 1978).

Encerado

El encerado es una técnica por medio del cual se recubren las raíces de yuca con cera producida a partir de la resina de colofonia. Los recubrimientos céreos son comúnmente usados para la conservación de frutas lo que les da un brillo característico. Al igual que en la técnica de parafinado, para esta técnica es necesario seleccionar las raíces más adecuadas; esto es, raíces enteras con 2-3 cm de pedúnculo, sin golpes ni magulladuras. Es importante realizar una poda de las raicillas para dar una mejor presentación a la yuca final y facilitar el proceso de encerado. Las raíces son lavadas para eliminar toda la tierra adherida. Luego, si se desea se realiza una desinfección de las raíces sumergiéndolas por tres minutos en una solución de tiabendazol al 0,001 por ciento. Las raíces se colocan sobre estantes bajo sombra para que se sequen al aire libre, no más de dos horas. Si se desea agilizar el proceso se pueden usar secadores de aire o ventiladores. Las raíces deben estar completamente secas antes de encerarlas; no se debe encerar la yuca mojada porque la cera en lugar de dar un recubrimiento transparente presentará un color blancuzco.

Existen diferentes métodos de aplicar la cera: inmersión, frotación y aspersión. El más recomendado, hasta el momento, es la frotación ya que este método permite controlar el grosor de la película de cera, evitando pérdidas del producto y obtener mayor rendimiento (140 kg de yuca/1 L de cera). La cera se aplica pura, sin diluirla, a temperatura ambiente usando guantes plásticos, esparciéndola por la superficie de la raíz de yuca por frotación manual, evitando dejar partes sin cubrir. Las raíces enceradas se dejan secar de 10-20 minutos a temperatura ambiente bajo sombra y no se deben almacenar si la cera no ha secado completamente. Las raíces enceradas se pueden conservar por más de 20 días (Montoya, 2004).

El almacenamiento a *largo plazo* (4 semanas o más) permite el almacenamiento de las raíces por periodos prolongados. Las técnicas de conservación que permiten estas condiciones son la *refrigeración* y la *congelación*.

Refrigeración

Esta técnica consiste en almacenar las raíces de yuca en un cuarto frío a una temperatura entre 0-2 °C y una humedad relativa entre 85-90 por ciento. Las temperaturas bajas inhiben los procesos enzimáticos responsables del deterioro fisiológico, lo cual permite conservar las raíces en buenas condiciones. Para obtener resultados satisfactorios, el almacenamiento se debe hacer inmediatamente después de la cosecha. Antes de refrigerarlas, las raíces se seleccionan y se lavan para retirar impurezas y luego se tratan con un producto desinfectante. Si además se colocan en bolsas plásticas y están rodeadas de buenas condiciones de almacenamiento, su conservación se prolonga por más tiempo. Para la refrigeración se puede utilizar un refrigerador doméstico común en la cual las raíces de yuca permanecen en buenas condiciones por más de cuatro semanas (IIT, 1978).

Congelación

Esta técnica de conservación es muy efectiva puesto que permite evitar ambas clases de deterioro y el tiempo de almacenamiento puede ser mayor. Sin embargo, una de sus desventajas además del alto costo de los equipos es que en estas condiciones las raíces pueden variar de textura y calidad culinaria.

En algunos países se comercializan los trozos o astillas de yuca congelados, en bolsas de plástico y para su expendio los supermercados cuentan con facilidades para conservarla congelada. Algunas empresas los congelan precocidos para que el comprador final emplee menos tiempo en la preparación. Para su preparación, en primer lugar se seleccionan las raíces que se destinarán a la congelación realizando un primer control para comprobar el tipo de variedad, la diversidad o rango de tamaños, el grado de madurez, ausencia de deterioro, de daños físicos y de ataques de hongos, virus y bacterias; se deben utilizar variedades de bajo contenido de HCN y en la prueba de calidad culinaria el tiempo de cocción no debe pasar de 20 minutos. Una vez seleccionadas las raíces, se lavan con agua, se eliminan sus extremos distal y proximal y se cortan en secciones cilíndricas de 5-6 cm de altura, luego se retira la corteza o cáscara gruesa de cada cilindro de pulpa. Los cilindros se lavan con agua por segunda vez y después se sumergen en una solución desinfectante de hipoclorito de sodio a 10 ppm. Durante la desinfección se debe verificar permanentemente la aparición de algún color parduzco o pardeamiento en la pulpa de las raíces. Los cilindros se parten a lo largo en cuatro trozos o astillas y de cada uno de ellos se elimina la fibra o vena central. Las astillas se lavan nuevamente con agua y si se considera conveniente también pueden ser desinfectadas; sin embargo, para garantizar su calidad al consumidor final, se sumergen en una solución de sustancias preservantes como sorbato o eritorbato de potasio durante 20 minutos. Las astillas se dejan escurrir y luego se empaican, en condiciones asépticas, en bolsas de polietileno de baja densidad. Finalmente, se congelan rápidamente a -30 °C en sus empaques o si se prefiere primero se congelan, luego se empaican y se almacenan. Las astillas empacadas se almacenan en cuartos fríos a una temperatura de -18 °C (Sánchez y Alonso, 2002).

Capítulo 5

Características del almidón de yuca

El almidón es quizás el polímero natural más importante que existe y es la mayor fuente de energía obtenida de varias plantas. Se encuentra en las semillas de cereales (maíz, trigo, arroz, sorgo), en tubérculos (papa), en raíces (yuca, batata, arrurruz), en semillas de leguminosas (frijoles, lentejas, guisantes), frutas (bananas y manzanas y tomates verdes), troncos (palma sagó) y hojas (tabaco).

El alto contenido de almidón de la yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón, hace de este un importante cultivo industrial además de ser un cultivo alimenticio rico en calorías. El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, pero por delante de la papa y el trigo; se usa principalmente sin modificar, es decir como almidón nativo, pero también es usado modificado con diferentes tratamientos para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación, dispersión y de esta manera poder usarlo en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares.

COMPONENTES DEL ALMIDÓN

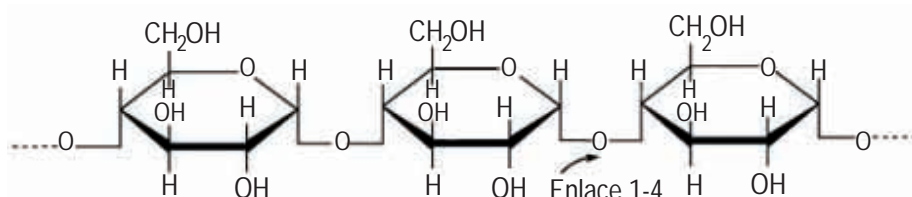
El almidón está constituido por unidades de glucosa dispuestas en dos componentes: amilosa y amilopectina; su proporción varía de un tipo a otro según sea su fuente. Estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación.

El contenido de amilosa y el grado de polimerización -número total de residuos anhidroglucosa presentes dividido por el número de terminales reducidos- son importantes en la determinación de las propiedades físicas, químicas y funcionales del almidón. Por ejemplo, el tamaño de los gránulos del almidón muestra relación con la proporción amilosa/amilopectina (Delpeuch y Favier, 1980).

Amilosa

Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4), el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones pero generalmente se encuentra entre 1 000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral. En un extremo de la macromolécula la unidad de glucosa contiene el hidroxilo del carbono anomérico (a) libre, por lo cual se llama extremo reductor (Aspinal, 1983). En el extremo opuesto, o no reductor, el hidroxilo del carbono anomérico forma parte del enlace glucosídico (Figura 7). La abundancia de hidroxilos

FIGURA 7
Esquema de la amilosa



otorga propiedades hidrofílicas al polímero, impartiendo afinidad por el agua. Sin embargo, debido a su linealidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma paralela mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua.

En soluciones diluidas, el tamaño de agregación de los polímeros se puede incrementar hasta el punto en que ocurre precipitación. En general, la estructura lineal de la amilosa favorece la formación de películas fuertes. Este fenómeno de asociación intermolecular entre las moléculas de amilosa es comúnmente llamado *retrogradación*.

La amilosa forma muchos complejos insolubles con un gran número de moléculas orgánicas como alcoholes alifáticos, ácidos monoglicéridos o ácidos grasos lineales; el complejo generalmente precipita cristalizándose lo que permite hacer la separación con la amilopectina. La amilosa tiene afinidad por el yodo y sus moléculas contienen segmentos hidrofílicos e hidrofóbicos. El color del complejo es característico de la amplitud de la cadena, azul para un grado de polimerización mayor de 40 y rojo, pardo o amarillo para un valor menor que este (Wurzburg, 1986).

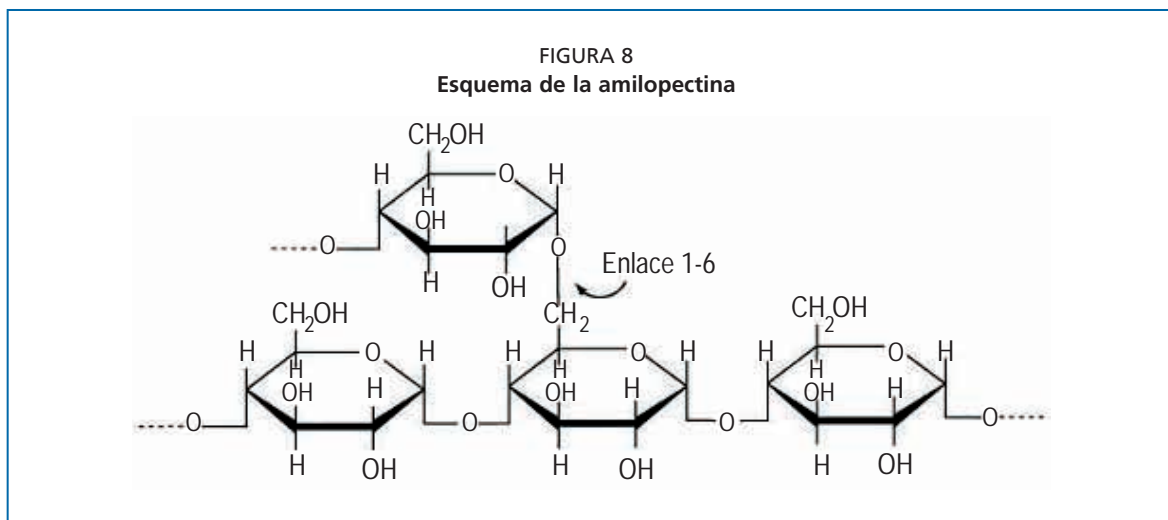
Amilopectina

Es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces α -D-(1 \rightarrow 4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces α -D-(1 \rightarrow 6) que forman los puntos de ramificación (Figura 8). La amilopectina tiene 5-6 por ciento de enlaces α -D-(1 \rightarrow 6) y está constituida de alrededor de 100 000 moléculas de glucosa (Duprat *et al.*, 1980).

El gran tamaño y naturaleza ramificada de la amilopectina reduce la movilidad de los polímeros e interfiere su tendencia a orientarse muy estrechamente para permitir niveles significativos de enlaces de hidrógeno. Como resultado, los soles o soluciones acuosas de amilopectina se caracterizan por su claridad y estabilidad como medida de la resistencia a gelificarse durante el almacenamiento. Los soles de amilopectina no forman películas tan fuertes y flexibles como la amilosa y no forman un complejo con yodo asociado con su coloración azul profunda.

La amilopectina en sus estructuras lineales puede formar también complejos; pero como estas partes lineales son cortas, las hélices que se forman son cortas y solo se pueden introducir moléculas pequeñas dentro de ellas. La amilopectina puede formar complejos de color rosa con el yodo y no puede formar complejos con los ácidos grasos.

Las cadenas lineales de los dos polímeros pueden formar hélices con seis moléculas de glucosa por cada ciclo. En el caso de la amilopectina, los enlaces α -D-(1 \rightarrow 6) son



CUADRO 2

Propiedades de los componentes del almidón

Propiedad	Amilosa	Amilopeptina
Estructura	Lineal	Ramificada
Longitud promedio de la cadena	Aprox. 1 000	20-25
Peso molecular	40 000 hasta 10 ⁶	200 000 hasta 10 ⁹
Grado de polimerización	Aprox. 1 000	10 000–100 000
En solución	Hélice extendida o enrollada	Esfera irregular
Estabilidad en soluciones acuosas	Retrógrada	Estable
Acomplejamiento	Con facilidad	Con dificultad
Retrogradación	Rápida	Muy lenta
Gel	Firme e irreversible	Suave y reversible
Formación de complejos	Favorable	Desfavorable
Patrón de rayos X	Cristalino	Amorfo
Digestibilidad de la β -amilasa	Casi completa	Cerca de 60 %
Reacción con yodo	19-20 %	5-9 %
Color con la solución de yodo	Azul profundo	Violeta
Longitud de onda máxima (nm)	Aprox. 660	530-550

Fuente: Skeist (1977) y Aspinal (1983).

puntos de ruptura para la formación de las hélices y únicamente pueden formarse hélices cortas con las partes lineales de la molécula. En cambio hélices constituidas de 120 moléculas de glucosa pueden formarse con la amilosa.

El nivel de amilosa encontrado en el almidón varía dependiendo del origen. Muchos almidones tales como del maíz común, trigo, papa y yuca contienen alrededor de 18-28 por ciento de amilosa; el maíz y el trigo están en el extremo alto del rango, mientras la papa y la yuca están en el extremo más bajo. El almidón de yuca tiene entre 17-22 por ciento de amilosa. La estructura y la cantidad relativa de ambos componentes del almidón juegan un papel importante en la determinación de las propiedades fisicoquímicas del almidón (Cuadro 2).

La organización intramolecular entre amilosa y amilopeptina con enlaces hidrógeno entre los grupos alcohólicos, directamente o a través de moléculas de agua, conduce a la formación de zonas cristalinas (capas densas con un alto número de ramificaciones) y amorfas [(capas menos organizadas ricas en puntos de enlaces α -D-(1 \rightarrow 6)]. Esto da al almidón una estructura semicristalina, con propiedades específicas como la presencia de un cruce en el gránulo ante una observación con luz polarizada y la difracción de los rayos X con tres tipos de espectro que permiten diferenciar los almidones de cereales, raíces y tubérculos. Sin embargo, en esta clasificación hay algunas excepciones como la yuca que presenta un espectro similar al de los cereales.

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL ALMIDÓN

Las propiedades fisicoquímicas son las que determinan el uso del almidón de yuca. Entre las propiedades fisicoquímicas más importantes encontramos la composición proximal (contenido de proteína cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y humedad), las características del gránulo (tamaño, color y forma, naturaleza cristalina), el peso molecular y el contenido de amilosa.

El contenido de proteínas del almidón de yuca y de papa es bajo, cerca del 0,1 por ciento, comparado con el de los almidones de arroz y de maíz (0,45 y 0,35 por ciento, respectivamente). La proteína residual afecta el sabor y olor de los almidones de cereales y tienden a formar espuma.

Los gránulos del almidón de papa y yuca contienen un pequeño porcentaje de lípidos, comparado con los almidones de cereales -maíz y arroz- los cuales contienen respectivamente 0,6 y 0,8 por ciento. Esta composición favorece al almidón de yuca, ya que estos lípidos forman un complejo con la amilosa, la cual tiende a reprimir el

CUADRO 3
Características de los gránulos de almidón

Almidón	Tipo	Morfología	Diámetro (µm)	Contenido de amilosa (%)	Temperatura de gelatinización (°C)	Temperatura de gelificación (°C)	Propiedades de cocción
Maíz	Cereal	Redondo poligonal	5-30	25	62-72	80	Gel opaco
Maíz ceroso	Cereal	Redondo poligonal	5-30	<1	63-72	74	Claro cohesivo
Yuca	Raíz	Ovalado truncado	4-35	17	62-73	63	Claro cohesivo tendencia a gelificar
Papa	Tubérculo	Ovalado esférico	5-100	20	59-68	64	Claro cohesivo tendencia a gelificar
Trigo	Cereal	Redondo lenticular	1-45	25	58-64	77	Gel opaco
Arroz	Cereal	Esférico poligonal	3-8	19	68-78	81	Gel opaco
Sago	Tronco	Ovalado truncado	15-65	26	69-74	74	Gel opaco

Fuente: Taggart (2004).

hinchamiento y la solubilización de los gránulos del almidón; por esta razón se necesitan temperaturas altas (> 125 °C) para romper la estructura amilosa-lípido y solubilizar la fracción de amilosa. La mayor parte de estos lípidos son liso-fosfolípidos; es decir una cadena de ácido graso esterificada con ácido fosfórico. La presencia de sustancias grasas puede crear problemas por la tendencia a la rancidez durante el almacenamiento (Hurtado, 1997).

Los gránulos del almidón de yuca no son uniformes en tamaño y forma: son redondos con terminales truncados, un núcleo bien definido y su tamaño varía entre 4-35 mm con un promedio de 20 mm. Los gránulos de los almidones de arroz, maíz y maíz ceroso tienen forma poliédrica, mientras que los gránulos del almidón de papa son ovoides y presentan los gránulos de mayor tamaño 5-100 mm, con un promedio de 33 mm. El tamaño de los gránulos de maíz y maíz ceroso es de 5-30 mm, con un promedio de 15 mm, similar al de los gránulos del almidón de yuca. Los gránulos más pequeños son del arroz, los cuales varían de 3-8 mm, son considerados como los más resistentes a procesos con altas temperaturas como la esterilización y poseen mayor digestibilidad. El Cuadro 3 muestra la comparación de algunas propiedades fisicoquímicas de varios almidones. En algunos almidones, el tamaño de los gránulos de almidón muestra relación con su proporción amilosa/amilopectina (Delpeuch y Favier, 1980).

Los patrones de difracción a los rayos X de los gránulos de almidón nativo de yuca son de tipo intermedio (tipo C), entre los patrones característicos de los almidones de los cereales (tipo A) y los almidones de frutas y tubérculos (tipo B). El nivel de cristalización en el almidón de yuca es de alrededor de 38 por ciento. La cristalinidad del gránulo se debe esencialmente a la amilopectina (Richard *et al.*, 1991).

PROPIEDADES FUNCIONALES DEL ALMIDÓN

Las propiedades funcionales de los almidones dependen directamente de la relación amilosa/amilopectina. En los distintos cultivos amiláceos esta relación es constante, si bien cambia de una variedad a otra dentro de la especie y también entre plantas de la misma variedad.

Para apreciar el potencial del uso industrial y alimenticio del almidón de yuca es fundamental comprender las propiedades funcionales del almidón. Estas propiedades están influenciadas por factores genéticos (diferencias varietales) y por factores como la edad de la planta, la época de cosecha, la fertilidad del suelo y la precipitación, entre otras cosas.

Las características funcionales de los almidones son: solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento, tendencia a retrogradar, propiedades de la pasta (viscosidad, consistencia, estabilidad del gel, claridad y resistencia al corte, formación de película), digestibilidad enzimática y capacidad de emulsificación.

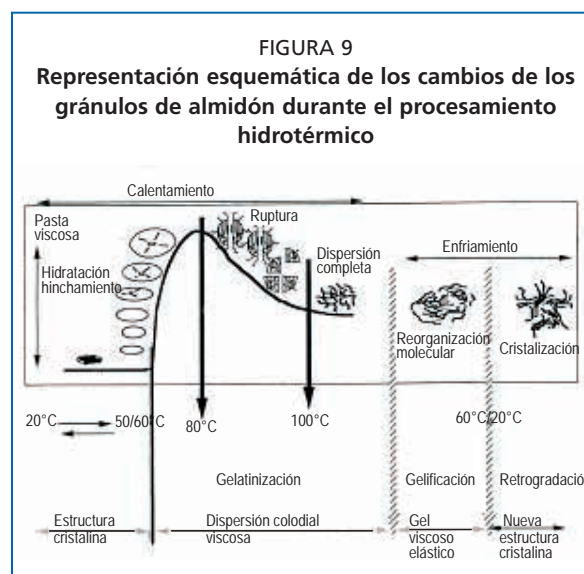
Durante un tratamiento hidrotérmico, el almidón sufre una serie de modificaciones que van a influir sobre su estructura, pasando por tres fases importantes: gelatinización, gelificación y retrogradación, los cuales causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos de almidón (Figura 9).

Gelatinización

En una primera fase el agua se difunde por las zonas amorfas del gránulo de almidón, produciéndose un primer hinchamiento que es reversible. Durante esta etapa de cocción, la amilosa se solubiliza y el almidón sufre una dispersión coloidal constituida por una fase continua o disolvente que se enriquece en amilosa y una fase dispersa de gránulos de almidón hinchados y enriquecidos en amilopectina. En esta etapa, los gránulos conservan sus propiedades ópticas incluyendo la capacidad de refractar la luz polarizada (birrefringencia), la cual está asociada a la alineación de las moléculas dentro del gránulo. Se ha observado que los gránulos de almidón de yuca tienen baja birrefringencia a temperaturas entre 58-64 °C, comparados con los gránulos de maíz que la poseen a temperaturas entre 62-68 °C.

Si el calentamiento continúa, las moléculas de agua alrededor de los gránulos rompen los enlaces de hidrógeno en el interior de los gránulos, estos absorben agua lentamente y se hinchan. Este proceso es irreversible y ocurre después de que se alcanza una temperatura crítica que depende de la humedad presente, definida como la temperatura de transición vítrea T_g (Temperatura de gelatinización) la cual es característica de cada almidón, pero también depende de la concentración de la suspensión. Cuando la molécula de almidón está completamente hidratada empieza a expandirse -se abre la hélice de la cadena- primero hacia el extremo externo y la cadena lineal más corta (amilosa) tiende a difundirse. Alcanzada esta temperatura se incrementa el hinchamiento y la birrefringencia desaparece; este fenómeno endotérmico se denomina *gelatinización* (Waniska y Gómez, 1992). La gelatinización ocurre en un intervalo de temperatura muy limitado, produce el hinchamiento del gránulo y la solubilización parcial de los polímeros, fenómenos que inducen la aparición de propiedades viscoelásticas las cuales se generan en un amplio intervalo de temperatura.

La absorción de agua y el aumento de volumen van acompañados de un fuerte aumento de la viscosidad hasta llegar a un máximo llamado *pico de viscosidad*, en el cual el gránulo se rompe y ocurre una difusión de amilosa y amilopectina, generándose una mezcla de gránulos hinchados ricos en amilopectina, gránulos fundidos hidratados y moléculas disueltas de amilosa (Howling, 1980). La máxima viscosidad es el resultado del máximo hinchamiento, formándose una dispersión en medio acuoso, la cual es llamada pasta o engrudo. Cuando la temperatura de una suspensión acuosa de almidón es superior a la temperatura de gelatinización, los enlaces de hidrógeno se continúan destruyendo, las moléculas de agua empiezan a anexarse a los hidroxilos liberados y los gránulos se continúan hinchando. Como resultado directo del hinchamiento de los gránulos hay un incremento de la solubilidad del almidón.



Gelificación y retrogradación

Durante la etapa de enfriamiento se distinguen dos etapas, la gelificación y la retrogradación. En la *gelificación* las moléculas de almidón se vuelven menos solubles y tienden a agregarse. La *retrogradación* es la cristalización de las cadenas de los polímeros que son agregados en el gel, cuando las pastas de los almidones son enfriadas y ocurre en tres estados: a) dilatación de las cadenas debido al rompimiento de los enlaces intermoleculares que mantienen la configuración helicoidal, b) pérdida del límite de agua seguido de una reorientación de las moléculas y, finalmente c) una formación de enlaces de hidrogeno entre moléculas adyacentes formando una estructura cristalina (Mestres, 1996). Esta cristalización va a endurecer el gel y acarrear el fenómeno de sinéresis, es decir, la expulsión de una parte del disolvente fuera del gel que produce una caída de la viscosidad. El grado de retrogradación es afectado por la concentración de amilosa y amilopectina, tamaño molecular, temperatura, pH y los componentes diferentes al almidón presentes en el medio. Es favorecido por bajos pH, aunque a valores de $\text{pH} < 3$ la cantidad de material precipitado disminuye debido a la hidrólisis del almidón.

La estructura de amilosa permite la formación de muchos sitios de enlace entre moléculas adjuntas por lo cual la retrogradación es asociada en gran parte con la fracción de amilosa, adicionado a su alto peso molecular. Altas concentraciones de amilosa implican formación de geles fuertes, opacos y que sufren sinéresis. Bajas proporciones de amilosa generan dispersiones claras y viscosas que no gelifican.

Comportamiento de diferentes almidones

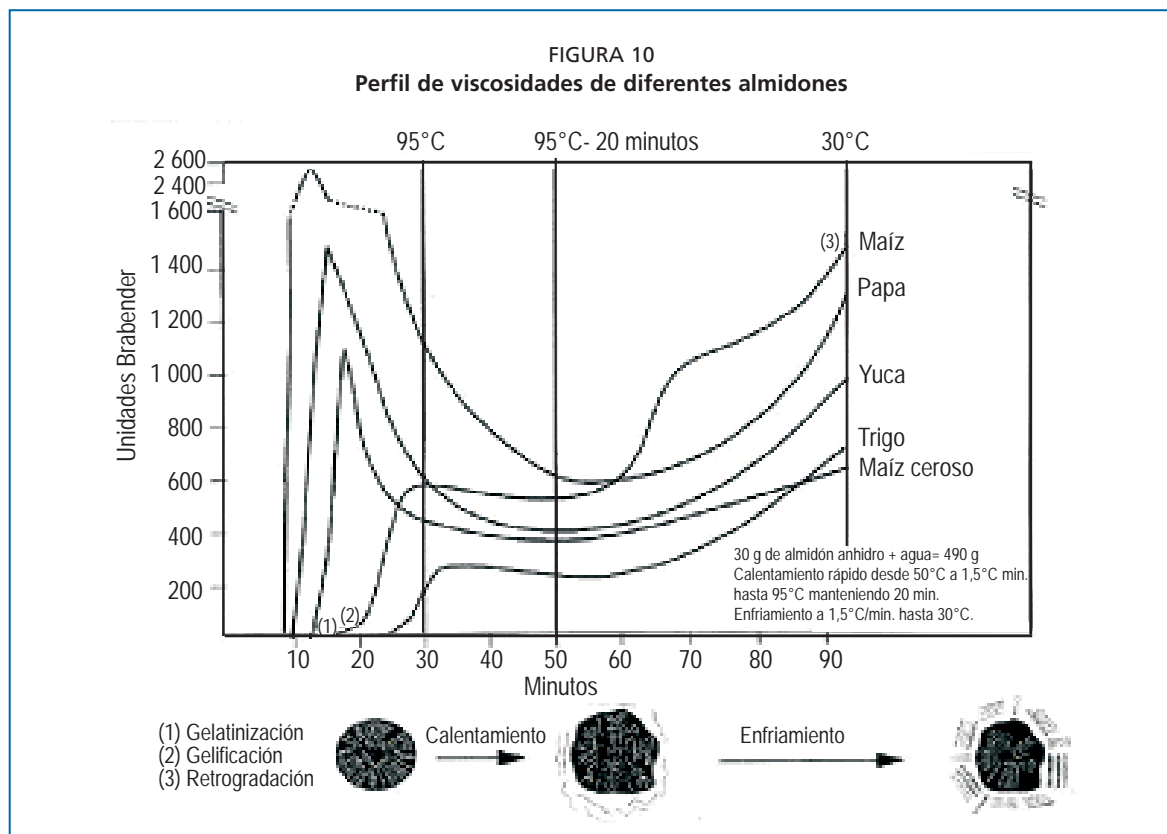
El almidón de los tubérculos y las raíces presenta un fuerte elevamiento de viscosidad durante el cocimiento, mucho mayor que el de los cereales. Los gránulos de almidón de papa, yuca y maíz ceroso presentan picos de viscosidad más altos que los de maíz y trigo. Esto es debido a que los almidones de papa, yuca y maíz ceroso tienen mayor capacidad de absorción de agua, mayor velocidad de hidratación y se desintegran más rápidamente. La Figura 10 muestra las curvas de viscosidad de diferentes almidones nativos generadas por un viscógrafo. Los valores de viscosidad pueden variar con la temperatura, velocidad y concentración de la solución de almidón utilizada en el viscógrafo.

El *almidón de maíz* muestra un rápido incremento de la viscosidad después de la gelatinización, hasta llegar a un punto máximo. La viscosidad disminuirá gradualmente durante el periodo de mantenimiento de la temperatura y posteriormente tendrá un incremento muy fuerte mientras la pasta se enfría y retrograda.

El *almidón de maíz ceroso* prácticamente no tiene moléculas lineales de amilosa, es altamente estable y resistente a la retrogradación; al contrario, los almidones con alto contenido de amilosa tienen una retrogradación muy rápida. Su pasta permanecerá fluida y clara e incrementará su viscosidad más rápidamente que el maíz regular, su viscosidad máxima será mayor y se obtendrá más rápidamente produciendo pastas con poco cuerpo y muy cohesivas. El rompimiento será más rápido y acentuado. En el enfriamiento se presenta un ligero aumento en la viscosidad ya que no gelifica ni presenta sinéresis.

El *almidón de papa* absorbe más agua mostrando un máximo inicial mayor. Su temperatura de gelatinización es menor, debido a que los grupos éster-fosfato presentes en el gránulo de papa tienden a debilitar los enlaces provocando un espesamiento más rápido al calentarse. El máximo pico de viscosidad cae rápidamente durante el mantenimiento de la temperatura. La solución muestra poca tendencia a retrogradarse durante el enfriamiento (Waniska et al., 1992).

El *almidón de yuca* gelatiniza a la misma temperatura del almidón de maíz y del almidón de maíz ceroso, a temperaturas relativamente bajas (62-73 °C); el pico máximo es alcanzado rápidamente, lo que implica que es un almidón fácil de cocinar y requiere



Fuente: Taggart (2004).

menor consumo de energía durante su cocción. Además, tiene una tendencia baja a la retrogradación y produce un gel de mayor claridad y estabilidad en comparación con el de otros almidones nativos (Whistler, 1984). Su temperatura de gelatinización (63 °C) es similar a la del almidón de papa, pero está por debajo de las temperaturas de gelatinización de los cereales (74-81 °C). Aunque la viscosidad de la pasta es inicialmente alta, esta decae bruscamente con agitación continuada por encima de 90 °C y con un subsecuente enfriamiento no hay formación de gel.

Este comportamiento del almidón de yuca lo hace tecnológicamente conveniente como sustrato para procesos hidrolíticos pero inapropiado como sustituto para los almidones de cereales en procesos que requieren retrogradación. Las propiedades de claridad y baja retrogradación del almidón de yuca pueden ser utilizadas en muchos productos alimenticios. Sus características reológicas se asemejan bastante al almidón del maíz ceroso. Las pastas de almidón de yuca son estables a medios ácidos por debajo de pH 2,4, medio en el cual hay destrucción del gránulo y del aspecto físico de la pasta debido a una hidrólisis parcial o total. La pasta de almidón de yuca ha sido considerada resistente al proceso de congelación, lo que disminuye generalmente la exudación de agua o sinéresis y deteriora la estructura de la pasta (Hurtado, 1997).

Si un almidón muestra un alto poder de hinchamiento y alta solubilidad esto refleja la baja fuerza de asociación en los gránulos. El poder de hinchamiento de los almidones de cereales es más limitado que el que se observa para los almidones de tubérculos. La capacidad de absorción de agua depende directamente del tipo de almidón, lo que es mayor en almidones de tubérculos que con almidones de cereales, pero también depende de factores como el contenido de amilopectina, el tamaño y la forma de los gránulos. La solubilidad del almidón de yuca es alta, similar al del almidón de papa mientras que en los almidones de cereales se reduce debido a la presencia de lípidos.

Capítulo 6

Almidones modificados

Los almidones nativos, incluyendo el almidón de yuca, presentan ciertas limitaciones para uso industrial. Por lo tanto, son modificados para mejorar sus propiedades funcionales y tener un amplio rango de aplicaciones industriales. Los productos resultantes o almidones modificados son, consecuentemente, productos de mayor valor agregado.

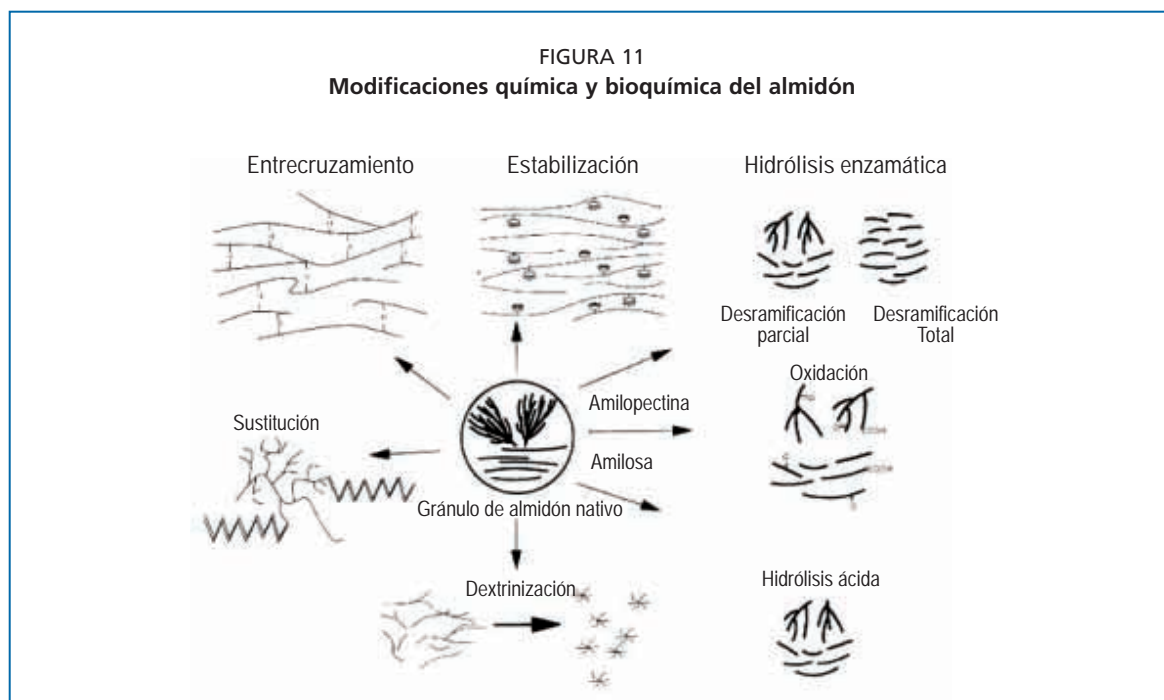
Los gránulos de almidón son tratados química, física y bioquímicamente para causar la ruptura de algunas o todas las moléculas (Figura 11). La modificación del almidón permite realzar o inhibir propiedades como consistencia, poder aglutinante, estabilidad a cambios en el pH y temperatura y mejorar su gelificación, dispersión o fluidez. Las principales modificaciones son la degradación, la pregelatinización y la derivatización, los cuales se resumen a continuación, junto con los almidones modificados y sus aplicaciones (Vian, 1994).

Degradación

Son procesos que involucran depolimerización parcial o arreglos de moléculas. Estos incluyen procesos hidrolíticos, oxidativos y térmicos, los cuales producen tres clases de almidones modificados: de conversión ácida, oxidados y dextrinas. El principal propósito de la conversión es reducir la viscosidad de los productos para que con altas concentraciones la solución tenga buenas propiedades de flujo.

Hidrólisis de almidón

Las posibilidades van desde la hidrólisis parcial hasta la total con presencia o no de catalizadores.



Fuente: Taggart (2004).

- *Hidrólisis parcial*. Se obtienen almidones de baja solubilidad en agua fría y alta solubilidad en agua caliente, dando geles de baja viscosidad utilizados en la industria alimenticia como espesantes, o para dotar a los alimentos de una película protectora.
- *Hidrólisis parcial con ácidos*. Se efectúa preferentemente sobre la amilopectina y permite obtener productos que se disuelven y gelifican mejor dando una menor viscosidad. Se emplean como estabilizantes y en la preparación de jaleas.
- *Hidrólisis total, ácida o enzimática*. Se produce glucosa o dextrosa. Cuando la reacción se completa, la suspensión se neutraliza, filtra y concentra para cristalizar la dextrosa. Los jarabes de glucosa obtenidos son muy empleados en la industria de bebidas.

Dextrinización

Las dextrinas son productos de degradación parcial del almidón obtenidas por calentamiento, con o sin catalizadores, en un mecanismo de conversión que involucra procesos de ruptura hidrolítica, reorganización de moléculas y repolimerización. El calor rompe parte de las uniones 1-4 del almidón e incrementa las uniones 1-6, con lo que se disminuye la longitud de las cadenas moleculares, al tiempo que se incrementa la ramificación. Esto determina una buena solubilidad en agua fría, menor tendencia a la retrogradación y mayor resistencia a las enzimas. Dada la forma corriente de obtención se denominan también pirodextrinas. La manufactura de dextrinas puede ser realizada por dos métodos:

Método seco

El almidón es calentado solo o en presencia de pequeñas cantidades de un catalizador. Hay tres clases de pirodextrinas industriales y cada una tiene características propias de color, poder viscosante y solubilidad en agua fría, a saber:

- *Dextrinas blancas*. Se preparan calentando almidón con una cantidad relativamente grande de catalizador ácido, a pH bajo, baja temperatura entre 80-120 °C y tiempos de tostación relativamente cortos de 3-8 horas. Son de color blanco similar al almidón, su solubilidad en agua es limitada y tiende a retrogradar en grados variables.
- *Dextrinas amarillas o canarias*. Se obtienen por tratamiento del almidón con trazas de ácido, a pH bajo y alta temperatura entre 150-220 °C, por largo tiempo de tostación de 6-18 horas. Presentan un distintivo color amarillo y tienen alta solubilidad en agua.
- *Gomas británicas*. Se forman cuando el almidón solo se calienta a temperatura de 180-220 °C, a alto pH y por un tiempo largo de proceso de 10-20 horas. Son de color marrón oscuro, tienen gran variación en solubilidad y poder viscosante. Tienen aroma de caramelo.

Las dextrinas tienen una amplia gama de aplicaciones a nivel industrial. Una de las más difundidas es como adhesivo para la elaboración de tubos en espiral, formado de sacos multipliego y bolsas de papel, cierre de cajas de cartón y pegado de etiquetas sobre vidrio; debido a sus características tales como viscosidad estable, alto porcentaje de sólidos y excelentes propiedades de rehumedecimiento. Además son usadas como aglutinantes, diluyentes para colorantes y aromas (Kennedy y Fischer, 1984).

Método húmedo

El almidón se dispersa en agua y es calentado en presencia de un catalizador o tratado con enzimas. Cuando se usa un catalizador ácido las dextrinas son producidas por simple calentamiento de suspensiones acuosas de almidón con ácido. Son usadas para textiles o adhesivos; sin embargo, poseen cierta cantidad de dextrosa y su presencia

en cantidades excesivas causa rompimiento de la película adhesiva con la consecuente disminución de su fuerza.

La conversión con enzimas se lleva a cabo por tratamiento de una pasta de almidón, con enzimas hidrolíticas. Según el tipo de enzima pueden ser:

- *Maltodextrinas*. Se obtienen por tratamiento del almidón con α -amilasa. El jarabe resultante es filtrado y refinado con carbón activado antes del secado por aspersión. Su equivalente de dextrosa (DE) varía entre 3-20. Se utilizan en alimentos como encapsulantes de sabor, aromas y color, espesantes y estabilizantes de emulsiones y espumas y en formulaciones de alimentos infantiles y dietéticos.
- *Ciclodextrinas*. También llamadas dextrinas de *Schardinger*. Se producen por tratamiento del almidón con la amilasa de *Bacillus macerans*; esta enzima tiene la propiedad de transformar las cadenas lineales del almidón en moléculas cíclicas. Su acción es compleja y parece catalizar al menos tres reacciones que implican los fenómenos de ciclización, de acoplamiento y de hidrólisis. Entre sus principales aplicaciones se pueden citar la estabilización de sustancias volátiles, emulsiones y compuestos aromáticos, la formación de complejos de inclusión mejorando la estabilidad de la molécula en diferentes ambientes y aumentando su solubilidad. Su principal potencial se encuentra en el sector farmacéutico por su aumento en la solubilidad y la absorción de los complejos formados lo cual reduce la cantidad de medicamento y logra un mejor efecto terapéutico en el organismo. Otros de sus usos son la eliminación del colesterol de la materia grasa de la leche, como transportador de aromas y sabores, actúan como agentes encapsulantes, para el tratamiento de aguas residuales y pueden aumentar la germinación de semillas de cereales. Tienen como potencial como biocatalizadores de reacciones ácido-básicas con funcionalidades similares a la algunas enzimas (Vian, 1994).

Oxidación

Por reacción del almidón con hipoclorito en medio alcalino, se producen simultáneamente reacciones de oxidación e hidrólisis que rompen los enlaces glucosídicos del almidón. Se utilizan en la preparación de salsas y mayonesas y tienen una pequeña participación en el mercado del encolado. No retrogradan ni gelifican. Este tipo de almidones se utilizan como repelentes de agua para los productos comestibles que exhiben higroscopicidad, para la preparación de gelatinas y para productos enlatados. Los almidones oxidados junto con el isoxalato de sodio produce un producto químico adecuado para el tratamiento del cuero y, junto con bórax, son usados en lodos de perforación.

Pregelatinización

Los almidones pregelatinizados son útiles cuando se requiere que el producto pueda ser reconstituido en agua fría. La estructura del gránulo de almidón se rompe por cocción del almidón nativo y posterior secado en tambores rotatorios o por extrusión semiseca lo que permite su empleo en alimentos de preparación rápida, flanes, rellenos y salsas. En adhesivos se utiliza para laminar papel aluminio a papel o cartón, pero su secado es lento dado su bajo contenido de sólidos.

Derivatización

Las modificaciones químicas no degradativas involucran la introducción de pequeñas cantidades de grupos sustituyentes dentro del almidón por enlaces éster y éter; esto genera el debilitamiento de los gránulos de almidón, estabiliza las dispersiones y previene el alineamiento y retrogradación de las moléculas. La cantidad de grupos sustituyentes se determina generalmente por análisis y se registra como número de grupos por unidad de glucosa anhidra o como grado de sustitución (DS).

Esterificación

Los almidones pueden ser esterificados usando diferentes tipos de ácidos inorgánicos y orgánicos. Nitro-almidones, utilizados como explosivos se obtienen con el ácido nítrico (HNO_3). Con ácidos fosfóricos y fosfatos alcalinos y con los ácidos acético, succínico, adípico, cítrico o con derivados como el acetato de vinilo se obtiene un variado número de ésteres de almidón. Estos tienen una más baja temperatura de gelatinización y aumentan la velocidad de hinchamiento y la viscosidad de la pasta. Estos almidones tienen buena capacidad espesante y son muy estables en frío, con buenas propiedades de retención de agua a baja temperatura que los hace útiles en el campo de productos ultracongelados o congelados.

Los almidones modificados tienen una alta gama de aplicaciones a nivel industrial, las cuales se derivan de las propiedades físicoquímicas de los gránulos de almidón tras su transformación por diferentes tratamientos. Los principales almidones modificados y sus aplicaciones se resumen a continuación (Vian, 1994).

Eterificación

Una de las reacciones de eterificación más conocidas es la que se realiza con los óxidos de etileno o de propileno de la que se obtiene «almidón hidroxietílico» o «almidón hidroxipropílico». Los productos eterificados gelifican establemente en forma sólida (rígida). Se usan como estabilizantes y espesantes en la industria textil, de papel y cartón y en la alimentación para preparar conservas y congelados. En la industria del papel se utilizan como adhesivos corrugantes aprovechando su alta capacidad de retención de agua.

Entrecruzamiento

Los almidones entrecruzados se obtienen por reacción con moléculas bifuncionales como la epíclorhidrina, el oxícloruro de fósforo o anhídridos mixtos de ácidos orgánicos. Por esta ruta pueden obtenerse productos con cadenas entrecruzadas, más estables y de gran resistencia, con escasa tendencia al hinchamiento. Son de especial interés para alimentos congelados, sobre todo si el tratamiento se combina con esterificación. Además son usados en la industria de alimentos, particularmente en panificación para dar estructura y disminuir la actividad de agua de la masa con lo cual aumenta la vida útil del producto final y se produce un mayor rendimiento en el batido.

Almidones catiónicos

Se obtienen por reacción con cloruro de 2-diaminoetilo, que permite introducir grupos amino terciarios en la molécula de almidón. Son susceptibles de cargarse positivamente al dispersar el producto en agua. Se utilizan en la fabricación de papel, incorporándolos durante la desfibración de la celulosa, ya que al ser absorbidos favorecen el proceso y dan mayor resistencia al papel. Son productos más viscosos que el almidón, transmiten mejor la luz y sus dispersiones tienen menor tendencia a la retrogradación.

USOS DEL ALMIDÓN EN PRODUCTOS ALIMENTARIOS Y NO ALIMENTARIOS

El almidón y los productos de almidón son usados en variedad de formas tanto en la industria de alimentos como en la no alimentaria. En la alimentación, se usa como ingrediente de diferentes preparados y en la industria no alimentaria como materia prima básica o producto auxiliar para la elaboración de una amplia gama de productos. El consumo de almidón se destina aproximadamente 75 por ciento al sector industrial y el 25 por ciento al sector de alimentos. La industria de fabricación de papel y cartón usan cerca del 80 por ciento del almidón suministrado al sector industrial, seguido de textiles, adhesivos y otras industrias (IFAD y FAO, 2004).

Uso en productos alimentarios

En la industria de alimentos el almidón, tanto nativo como modificado, tiene un papel importante en la textura de varios preparados al aportar palatabilidad y aceptabilidad.

- Como medio de moldeo, para caramelos de frutas, rodajas de naranja y gomas de mascar.
- Como dador de cuerpo, imparte textura y estabilidad a caramelos y marmadelos.
- Como agente para espolvorear, combinado con azúcar pulverizada en gomas, caramelos y gomas de mascar.
- Como protector contra la humedad, de diversos productos en polvo -como azúcares- pues los almidones absorben humedad sin apelmazarse.
- Como espesante, da cuerpo y textura al alimento preparado; para sopas, alimentos para infantes, salsas, gelatinas sintéticas.
- Como agente coloidal, imparte textura, sabor y apariencia. La cocción del almidón produce una solución coloidal estable, compatible con otros ingredientes en productos alimenticios.
- Como aglutinante, para el ligamento de componentes. En la preparación de salchichas y embutidos cocidos.
- Como emulsificante, produce una emulsión estable en la preparación de mayonesas y salsas similares.
- Como estabilizador, por su elevada capacidad de retención de agua es usado en productos mantecados-helados.
- En la mezcla con harinas para bajar el contenido de proteínas y la fuerza del gluten en panaderías. En la fabricación de galletas para aumentar su propiedad de extenderse y crujir, además de ablandar la textura, aumentar el sabor y evitar que se pegue.
- En la preparación de bocadillos extruídos y expandidos.

Industria de edulcorantes

Dado que el almidón es un polímero formado por miles de unidades de glucosa su rotura produce glucosa como producto final. Los hidrolizados comerciales de almidón son clasificados de acuerdo al equivalente de dextrosa (DE) de los jarabes. Las maltodextrinas tienen un equivalente de dextrosa menor de 20. Los jarabes que tienen equivalentes de dextrosa entre 30-38 contienen principalmente dextrinas lineales y ramificadas de alto peso molecular. Los jarabes de alta conversión contienen 75-85 por ciento de unidades de glucosa, maltosa y maltotriosa. Pueden obtenerse maltodextrinas, jarabes de glucosa, dextrosa y fructosa cristalina y jarabes de alta fructosa. Cada uno de estos jarabes tiene sus propias características y aplicaciones.

Las maltodextrinas son usadas en gran variedad de alimentos, incluyendo mezclas secas para sopas y frutas saborizadas, bebidas lácteas, helados y mezclas para tortas. Se usan como sustitutos de grasa y encapsulantes de aroma y sabor.

Los jarabes de glucosa son usados principalmente en confitería y también para elaborar salsas enlatadas, jugos de tomate, dulces y encurtidos. Además son usados en la industria de adhesivos y en fundición y son la materia prima para la manufactura de alcohol, bebidas alcohólicas (cerveza, güisqui, vodka), ácido acético, acetona, jarabe de fructosa, glutamato monosódico; de ácidos carboxílicos tales como ácido cítrico, láctico, butírico, succínico, glutámico, glucónico y propiónico, entre otros, y de carbohidratos hidrogenados como sorbitol y manitol, el primero de ellos usado en la producción de vitamina C y como base de alimentos para diabéticos y el segundo usado como endulzante con bajo contenido de calorías.

La dextrosa es usada en la industria de alimentos panificados y sirve como azúcar fermentable y también contribuye a realzar el sabor y aroma y a dar el color de la corteza. En confitería, la dextrosa evita la cristalización de la sacarosa y disminuye la higroscopicidad del producto terminado. En la industria láctea, es usada en postres

congelados para controlar la excesiva dulzura y mejorar el sabor. En la industria farmacéutica, es usada en la producción de tabletas y en la formulación de líquidos intravenosos.

Los jarabes de alta fructosa, han desplazado en su mayoría a los jarabes de glucosa en la industria de bebidas no alcohólicas y son usados en la fabricación de bebidas carbonatadas y no carbonatadas. Su función es producir dulzura a bajos niveles y también balancear los sabores y ácidos para dar un producto aceptable. Son también usados en la elaboración de frutas en conserva, mermeladas y gelatinas y en la industria de panificación.

Los jarabes sólidos obtenidos por evaporación de los jarabes de hidrolizados de almidón son ampliamente usados en alimentos dietéticos debido a sus bajo valor calórico.

Uso en productos no alimentarios

En las industrias no alimentarias el almidón nativo y modificado son usados principalmente como:

- Adhesivo, para diferentes aplicaciones en la industria de papel y cartón.
- Apresto, en la industria textil como encolante de la urdimbre previo al proceso de tejido.
- Agente inerte, como excipiente, vehículo y elemento adhesivo de tabletas y productos medicinales.
- Espolvorante, como polvo fino en la preparación de cosméticos, germicidas, insecticidas y productos medicinales.
- Absorbente, en la preparación de jabones y detergentes para aumentar su efectividad y poder de limpieza.
- Aditivo de sedimentación, para recuperar sólidos en procesos de flotación y clarificación en la refinación de metales.
- Aglutinante, para formar moldes de arena en la industria de fundición y como ligante para formar aglomerados de polvos finos como las briquetas de carbón y en la elaboración de explosivos.
- Dispersante, para mejorar la dispersión y la estabilidad a alta temperatura de los fluidos utilizados en los taladros para la perforación pozos de petróleo o de agua; mejoran la viscosidad del lodo y la capacidad de retención de agua.
- Movilizante, como vehículo móvil en tintas de impresión.
- Diluyente, en la industria de colorantes para estandarizar las tinturas con respecto a los rangos de colores.
- Conservante, en la industria de artes gráficas en forma de adhesivo, el cual se aplica a las planchas de impresión litográfica para conservar la parte que no lleva imagen y protegerla de bacterias, corrosión o rayado.

Industria de papel y cartón

La industria de papel y cartón consume almidones con diversos tipos de modificación; el tipo varía en cada empresa de acuerdo a diversos factores entre los cuales se destacan: el tipo de aplicación, el tipo de papel producido, las condiciones de operación y tipo de maquinaria y los costos, entre otras. Esta industria exige tres características básicas en el almidón: blancura, bajo contenido de fibra y pocas impurezas. El almidón se usa en esta industria en varias formas:

- Como pegamento en masa o interno, su función es servir como aglomerante de los componentes que forman el papel, fibra celulósica y rellenos, formando una capa superficial que reduce la pelusa y aumenta la resistencia mecánica del papel a la aspereza y plegado, aumenta la solidez y la durabilidad del papel.
- En la prensa de encolado, el almidón -generalmente oxidado o modificado- se suele añadir a uno o ambos lados de la hoja de papel o cartón que se ha formado

y secado parcialmente para dar una textura lisa, mejorar su apariencia, evitar el desprendimiento superficial de fibras, impedir que la tinta se despegue en escritura o impresión, mejorar la resistencia a la humedad, dar opacidad al papel en el caso de los papeles blancos y prepararlo para un posterior recubrimiento como esmaltados u otros acabados.

- En la operación de revestimiento, cuando se necesita un revestimiento de pigmento para el papel, el almidón actúa como agente de revestimiento y como adhesivo.

En las empresas productoras de cartón corrugado se usa generalmente almidón nativo que en el transcurso de la operación es modificado con soda (almidón *carrier*) y mezclado posteriormente con almidón nativo. Este almidón sirve para la formación del cartón ya que permite unir las láminas planas de cartón a la lámina corrugada u ondulada.

Industria textil

En la industria textil los almidones se usan en las operaciones como encolado de la urdimbre, aprestado y estampado de tejidos. El colante o apresto se elabora con almidones eterificados y un lubricante. Se usa generalmente para fibras de algodón; mientras que para poliéster y acrílicos se requieren aprestos sintéticos.

El tejido puede engomarse de manera temporal o permanente:

- El engomado temporal, se aplica a la urdimbre inmediatamente antes de que esta se convierta en tejido, para que las hebras o hilazas sean más resistentes, flexibles, suaves y lisas. El agente encolante se deposita como una película sobre las hilazas de la urdimbre y las recubre totalmente. Evita así el deshilachado, el enredo, el moteado y la rotura de las hebras que perturban seriamente la elaboración del tejido.
- El engomado permanente, se emplea en el proceso de acabado del tejido y es relativamente estable; es decir, se mantiene hasta que la tela llega, por lo menos, a manos del consumidor. Este engomado mejora la textura de la tela, aumenta su brillo superficial, le da cuerpo y solidez para facilitar su manipulación, eleva su peso y la calidad del estampado y aumenta, en general, la apariencia y la sensación textil de buena calidad de la tela.

El almidón también es usado para el estampado de tejidos o para producir diseños en varios colores sobre la superficie lisa de un tejido acabado. Además se usa en lavandería para almidonar tejidos blancos y darles dureza y para restaurar apariencia y cuerpo a las prendas de vestir.

Industria de adhesivos

El almidón y algunos almidones modificados se usan para la elaboración de adhesivos para diversas aplicaciones en la industria de papel y cartón, ya sea para adhesivos de alta fuerza adhesiva o para colas de menor precio. Estos se emplean para el laminado de ciertos papeles, cerrado de cajas de cartón, fabricación de materiales de embalaje, papel de envoltura y cinta rehumedecibles, para el pegado de etiquetas sobre vidrio y enlatados, formación de sacos multipliegos de papel y bolsas de papel, elaboración de sobres. También son usados en la encuadernación de libros, sellado de cajas de cartón, pegado de papel de cigarrillos, fabricación de fósforos y cajas de fósforos.

Los adhesivos de almidón, que son adhesivos a base agua, son muy útiles para las empacadoras y etiquetadoras de alta velocidad por el costo relativamente bajo y la gran velocidad de adhesión.

Industria farmacéutica y cosmética

El almidón y algunos almidones modificados son ampliamente usados en la fabricación de píldoras o tabletas, en las cuales cumplen dos funciones: como agente de dispersión de polvo y como ligante del ingrediente activo de la tableta. Cuando esta es ingerida, el almidón absorbe rápidamente la humedad y se hincha causando un estrés interno al interior de la tableta el cual se desintegra y libera el ingrediente activo.

En la industria cosmética, se emplea en la fabricación de polvos faciales finos, polvos compactos y polvos nutritivos. También actúa como absorbente, mejorador de viscosidad y como vehículo para sustancias pastosas, líquidas o semisólidas en la elaboración de cremas y lociones de uso dermatológico (Balagopalan *et al.*, 1988).

Otras aplicaciones

El almidón puede ser utilizado también para la elaboración de los siguientes productos:

- Surfactantes orgánicos, tales como las alquilpoliglucosidasas las cuales se acogen a las nuevas tendencias de producción limpia en el uso de detergentes naturales y biodegradables en reemplazo de los surfactantes clásicos no iónicos. Se usan a la vez como activadores de blanqueo y en la producción de champús secos.
- Productos de fermentación, tales como eritritol, ácido glucónico e itacónico; aminoácidos como la lisina; enzimas tales como carbohidrasas y proteasas; antibióticos como tetraciclina y penicilina y vitamina como la B-12.
- Los complejos de amilosa con ácidos grasos libres, monoglicéridos o lisofosfolípidos tienen un uso potencial en productos de panificación ya que limitan la velocidad de fortalecimiento de la miga del pan. Algunos estudios han demostrado que estos complejos evitan la cristalización de la amilopectina, hecho que origina el endurecimiento del pan.
- Copolímeros de almidón por injerto; estos productos son obtenidos de mezclas de almidón como poliéster o acrilatos los cuales son usados como espesantes en sistemas acuosos, floculantes y clarificación de aguas residuales.
- Matrices de almidón, para encapsular materiales contaminantes que les permita tener mayor vida y una manipulación segura.
- Almidones hidocoloides con los que es posible concentrar una solución de goma hidrosoluble más de lo que es posible hacerlo por dispersión directa en el agua. Es posible preparar mezclas de estos almidones con propiedades reológicas muy diversas.
- Aspersores usados en horticultura; generalmente se usan dextrinas para ayudar a disolver el material y adherirlo al área tratada, aun después que la solución se ha evaporado.
- Almidones resistentes, es decir indigeribles por las glucosidasas humanas, los cuales favorecen el crecimiento de microorganismos benéficos para el colon, disminuyendo los riesgos de cáncer.
- Almidones como agente de barrera, utilizados para evitar la pérdida de líquidos o la absorción de grasa. La tecnología de barrera mejora sustancialmente los indicadores de aceptación de los productos tales como frituras y tecnologías de cocción de carnes.

Capítulo 7

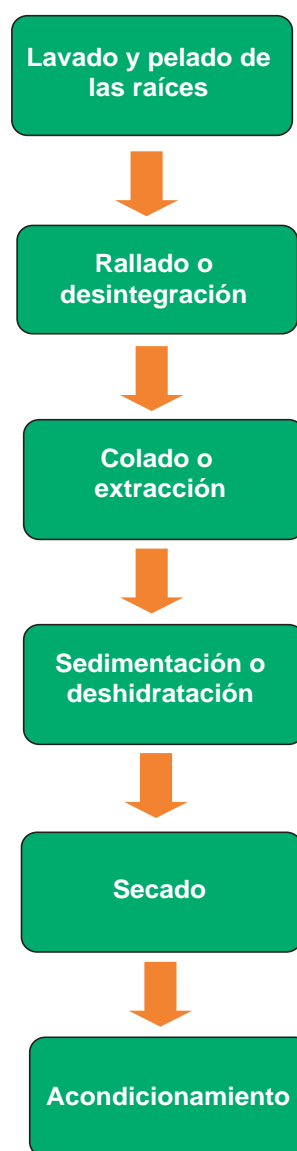
Extracción del almidón de yuca

La extracción del almidón de yuca es un proceso más simple y sencillo que la extracción de almidón de maíz, trigo u otros cereales. La industria del almidón de yuca es de importancia considerando el hecho de que aproximadamente el 85 por ciento de los almidones exportados por los países en desarrollo son almidón de yuca si bien el porcentaje de su producción en relación con la producción mundial de almidón es únicamente del ocho por ciento (Balagopalan y Padmaja, 1988). Los principios de la extracción del almidón de yuca se aplican en todas las tecnologías, aunque varían dependiendo de los equipos utilizados. Se encuentran procesos de manufactura artesanal, otros medianamente mecanizados y otras tecnologías modernas que mecanizan todas las etapas del proceso de manera eficiente. Al pasar de una tecnología media a una más evolucionada aumenta el nivel de extracción de almidón lo cual mejora notablemente la rentabilidad del proceso.

La manufactura de almidón de yuca comprende básicamente las siguientes etapas (Figura 12):

- *Recepción de las raíces:* las raíces una vez cosechadas deben ser transportadas a la planta de procesamiento dentro de las siguientes 24-48 horas para evitar su deterioro fisiológico y/o microbiano. Un factor importante en la producción de almidón de yuca de alta calidad, es que todo el proceso desde la cosecha de las raíces hasta el secado del almidón sea ejecutado en el más corto tiempo posible.
- *Lavado y pelado de las raíces:* en esta etapa se elimina la tierra y las impurezas adheridas a las raíces. La cascarilla se desprende por la fricción de unas raíces con otras durante el proceso de lavado. Normalmente, las pérdidas en el lavado son de 2-3 por ciento del peso de las raíces frescas. Se debe evitar pérdida de la cáscara ya que esta también contiene almidón.
- *Rallado o desintegración:* en esta etapa se liberan los gránulos de almidón contenidos en las células de las raíces de la yuca. La eficiencia de esta operación determina, en gran parte, el rendimiento total del almidón en el proceso de

FIGURA 12
Diagrama de flujo para la obtención de almidón de yuca



extracción. Si el rallado no es eficiente, no se logran separar totalmente los gránulos de almidón de las fibras; el rendimiento del proceso es bajo y se pierde mucho almidón en el afrecho desechado. Por otra parte, si el rallado es demasiado fino, los gránulos muy pequeños de almidón sufren daño físico y más tarde deterioro enzimático; la sedimentación sería más lenta ya que el gránulo fino pierde densidad y además se formaría mayor cantidad de mancha (CIAT, 1995).

- *Colado o extracción:* en esta etapa se realiza la separación de la pulpa o material fibroso de la lechada de almidón. Se debe evitar que pequeñas partículas de fibra pasen a la lechada de almidón; es por ello que en muchos casos se recomienda realizar un recolado de la lechada con el objeto de retener las fibras finas que pudieron pasar a la lechada.
- *Sedimentación o deshidratación:* se realiza por medio de sedimentación o centrifugación, para separar los gránulos de almidón de su suspensión en agua.
- *Secado:* puede ser realizado dependiendo del nivel tecnológico por secado solar o artificial. En ambos casos, se busca remover la humedad del almidón hasta un 12-13 por ciento.
- *Acondicionamiento:* comprende las etapas de molienda, tamizado y empaque.

MANUFACTURA DE ALMIDÓN A ESCALA ARTESANAL

El proceso es realizado casi completamente de forma manual con el uso de herramientas de mano y generalmente es hecho por grupos que emplean gran número de personas de la familia campesina lo que significa una fuente de ingreso para la comunidad. La producción varía entre 50-60 kg de almidón por persona/día. La eficiencia de la extracción es alrededor de 17-20 por ciento, es decir una relación de peso de raíces frescas: almidón de 6-5:1.

La operación de lavado es realizada con las manos o en algunas ocasiones con los pies (Lámina 14). El pelado de las raíces se realiza de forma manual, usando cuchillos para despojar la cascarilla o en algunos casos la corteza interior o cáscara (Lámina 15).

El rallado de las raíces se realiza en un rallador que puede ser una lata perforada estacionaria o un cilindro de acero perforado (Lámina 16). La pulpa obtenida es depositada sobre una tela que cuelga o está fija a un marco de madera debajo un depósito o tanque; el colado se realiza manualmente lavando con agua y exprimiendo



PDAR-CIAT

Lámina 14
Lavado de la yuca con los pies



PDAR-CIAT

Lámina 15
Pelado manual de raíces de yuca

la pulpa mientras la lechada de almidón es recolectada en el depósito (Lámina 17). El rendimiento obtenido manualmente depende de la variedad de yuca, del tipo de rallado empleado, del número de personas que intervienen en la operación y de su destreza.

Cuando los gránulos del almidón se han depositado, se retira el agua sobrenadante y la torta de almidón es desmenuzada para facilitar su secado. La etapa de secado se realiza al sol, depositando el almidón sobre techos de láminas de zinc (Lámina 18) o sobre esteras forradas con plástico negro, soportadas en estructuras de madera o guadua (Lámina 19). El almidón debe ser removido continuamente para hacer más eficiente el secado.

MANUFACTURA DE ALMIDÓN A MEDIANA ESCALA: SEMIMECANIZADA

La extracción de almidón a mediana escala procesa cerca de 1-10 toneladas de almidón por día. El rendimiento del proceso de extracción varía entre 17-25 por ciento, lo que corresponde a una relación de peso de raíces frescas: almidón de 6-4:1, dependiendo de la eficiencia de los equipos utilizados.

Las operaciones de lavado y pelado se realizan en una máquina lavadora/peladora, que consta de un tambor cilíndrico (Lámina 20), donde las raíces de yuca reciben chorros de agua mientras se friccionan unas con otras y contra la lámina del tambor que tiene agujeros rectangulares que permiten la salida de desechos. El agua es suministrada por un tubo bifurcado, que entra por los extremos del cilindro o en otros modelos se suministra a través de un eje central perforado, la cual ayuda a desprender las impurezas y la cascarilla de las raíces. La capacidad de una lavadora-peladora es de 1 000-1 500 kg/h y su consumo de agua es alrededor de 1 L de agua / kg de raíces. El tiempo de lavado de cada carga es de 5 minutos (Alarcón y Dufour, 1998).

Una vez lavadas las raíces, el rallado se realiza en un dispositivo formado por un cilindro de madera cubierto por una lámina de hierro galvanizado con perforaciones, una o dos perforaciones por cm², el cual gira a gran velocidad (1 200-1 300 rpm) y permite reducir las raíces de yuca a una pulpa (Lámina 21). El rendimiento promedio de este equipo es de 1 500 kg de raíces/h. Esta operación suele hacerse en seco, pero en algunos casos se utiliza agua cuando la pulpa se puede hacer fluir directamente a la operación de filtración. Cuando se ralla con agua aproximadamente se consume 1 L/kg de raíces. El rallador debe ser reemplazado frecuentemente debido a su rápido desgaste.



Lámina 16
Rallado manual



Lámina 17
Colado de pulpa o material fibroso



Lámina 18
Secado sobre techos en tejas de zinc



Lámina 19
Secado sobre esteras



Lámina 20
Lavadora/peladora de raíces de yuca

La masa rallada pasa a través de una coladora que consta de un cilindro asociado a un semieje el cual tiene aspas que mezclan la masa rallada de yuca con agua; gira a una velocidad de 20-22 rpm y se carga y descarga lateralmente. La lámina interior del cilindro está cubierta por una malla de tela o nailon la que permite el paso de la lechada de almidón y retiene la pulpa o material fibroso (generalmente, tamaño de malla 100-200). La capacidad normal de una coladora de este tipo es de 250-300 kg de masa rallada/h (Lámina 22).



Lámina 21
Rallador de raíces de yuca

La calidad del almidón, respecto a su contenido de fibras e impurezas, depende de la malla que se utilice; se puede obtener almidón de mejor calidad empleando malla 120 o más fina. Para evitar que pequeñas partículas de fibra pasen a la lechada de almidón, se recomienda realizar un recolado con el objeto de retener las fibras finas que pudieron pasar, operación que se puede realizar usando un tamiz vibratorio (Lámina 23).

La lechada de almidón que sale de la coladora contiene almidón, fibra fina y material proteico en suspensión. La sedimentación de la lechada se realiza en canales (Lámina 24) o en tanques de sedimentación (Lámina 25); esta etapa puede durar tres horas en los canales y de 6-8 horas en los tanques. Al final en los canales se obtienen tres capas: la capa inferior es el almidón, la intermedia se denomina mancha (almidón mezclado con material proteico) y la capa superior es agua. El agua sobrenadante es eliminada en un desagüe y se deja sedimentar de nuevo en un tanque para separar restos de mancha y luego es conducida a ríos o quebradas o recirculada para la operación de lavado y evitar la contaminación de las corrientes de agua. La mancha es retirada lavando con agua



Lámina 22
Coladora y tamiz vibratorio

la capa superior del almidón sedimentado y utilizando para ello una herramienta manual de limpieza que tiene un borde recubierto con caucho.

La capacidad de sedimentación de la lechada de almidón es una de las limitantes de esta tecnología. Si se emplean tanques de sedimentación la capacidad está limitada por el número de tanques de que se disponga. Los tanques se construyen con ladrillos y se recubren con baldosín, generalmente son de un volumen de 2-5 m³.

Si se emplean canales de sedimentación la operación es continua. Estos son de concreto y están revestidos de baldosa o cerámica que facilita la limpieza y evita el deterioro del concreto. Su sección transversal tiene 60 cm de ancho y 40 cm de profundidad. El canal ideal para crear un flujo laminar y lograr una sedimentación homogénea debería ser rectilíneo y de más de 180 m de largo. Por lo general no es posible hacer esta construcción por falta de espacio por lo que comúnmente se construye un laberinto o conjunto de canales paralelos de 25 cm cada uno, sin pendiente o inclinación durante su recorrido y diseñados de tal forma que sus puntas o extremos sean curvos o redondeados para evitar que la lechada de almidón choque contra las paredes de los canales, forme turbulencia por contraflujo y mezcle el almidón con la mancha en estos puntos. Se ha recomendado un sistema que consta de siete canales de 25-30 m de largo cada uno.

La sedimentación hecha en canales es más rápida, ya que un gránulo de almidón debe recorrer 0,8 m en un tanque de sedimentación y solo 0,1 m en los canales. En los tanques se mezcla parte de la mancha con el almidón y se pierde hasta un dos por ciento del almidón sedimentado cuando este se «desmancha»; en los canales casi toda la mancha sale suspendida en el agua residual y muy poca alcanza a sedimentar sobre la capa de almidón.

Una vez sedimentado el almidón en los canales o tanques de sedimentación, tiene una humedad entre 45-47 por ciento; es recolectado y transportado en bloques compactos y es desmenuzado con las manos o con un implemento quebrantador para ser secado por exposición al sol sobre patios de concreto (Lámina 26.) o sobre bandejas (Lámina 27) hasta un nivel de humedad de aproximadamente 12 por ciento. Para facilitar el secado en patios de concreto el almidón se seca sobre plástico de polietileno color negro calibre 6, a fin de captar mayor radiación solar y lograr un secado rápido y uniforme; se extiende en capas a razón de 1-2 kg/m².



CLAYUCA

Lámina 23
Tanques y canales de sedimentación



CLAYUCA

Lámina 24
Secado en patios de concreto



CLAYUCA

Lámina 25
Secado en bandejas



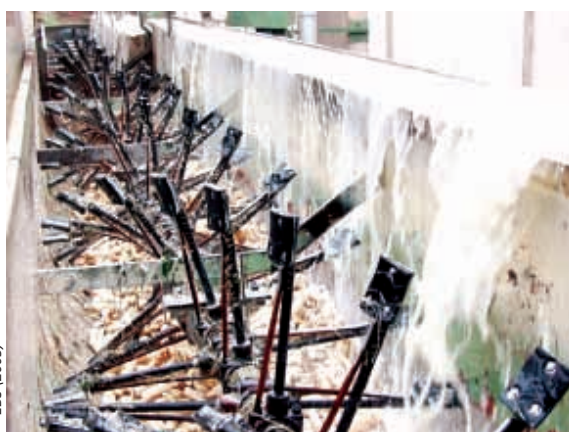
EBS (2005)

Lámina 26
Recepción de materia prima



EBS (2005)

Lámina 27
Prelimpieza de raíces



EBS (2005)

Lámina 28
Lavado y pelado de raíces

Generalmente para secar una tonelada de almidón en un patio de secado de 1 000 m², se requieren aproximadamente seis horas de sol. El almidón debe ser removido suavemente dos o tres veces durante este período con rastrillos; en esta operación el viento arrastra polvo de almidón ocasionado pérdidas de alrededor de 0,7 por ciento (Alarcón y Dufour, 1998). El secado es una de las etapas más limitantes en el proceso de extracción de almidón de yuca en las agroindustrias de mediana escala ya que se requieren grandes extensiones de suelo para los patios de secado y contar con un clima soleado favorable.

El almidón seco en forma de terrones es molido y posteriormente tamizado en mallas o tamices, generalmente entre malla 100–200; su finura o granulometría depende de las características del almidón que se desea obtener. Finalmente, es empacado en bolsas de papel multipliegos o en bolsas de polipropileno.

TECNOLOGÍA MECANIZADA DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA

En este tipo de tecnología todas las etapas del proceso de extracción de almidón de yuca son mecanizadas. Estas industrias procesan entre 15-150 toneladas de almidón por día. Su rendimiento varía entre 27-33 por ciento, o sea una relación de peso de raíces frescas: almidón de 3-3,7:1.

Generalmente en este tipo de tecnología se utiliza cosecha mecanizada. El procesamiento en estas agroindustrias comienza en la recepción y pesaje de la carga de yuca (Lámina 28). Los camiones son pesados y conducidos a rampas de descarga que los conducen a un depósito recibidor, generalmente de concreto, donde las raíces son almacenadas para alimentar el proceso industrial en un tiempo máximo de 24 horas. Generalmente, el exceso de tierra que viene unida a las raíces es devuelto a los camiones, para de esta manera aumentar la eficiencia de la cantidad de materia prima entregada.

Del depósito las raíces de yuca son conducidas por elevadores hacia una etapa de prelimpieza donde se eliminan excesos de impurezas tales como pedúnculo o pequeños tallos remanentes y tierra cuya presencia

dificulta el pelado y aumenta el contenido de fibra del almidón además de disminuir la vida útil de las lagunas de sedimentación (Lámina 29).

Las raíces de yuca son conducidas a los lavadores por medio de bandas transportadoras. Los lavadores son tambores cilíndricos con un eje central provisto de

aspas, diseñados para lavar y pelar las raíces simultáneamente. La acción combinada de chorros de agua a alta presión y la abrasión de las raíces contra las paredes del tambor y entre ellas, remueve más fácilmente la cascarilla (Lámina 28). Luego, se realiza una clasificación e inspección de las raíces a través de bandas que alimentan a los trituradores. La inspección es visual y manual para retirar impurezas que se hayan pasado en la etapa de prelimpieza y que puedan dañar algún equipo interfiriendo en la calidad del producto extraído (Lámina 29).

Luego de la inspección, las raíces lavadas y peladas son alimentadas a un triturador cuya función es estandarizar su tamaño a 2-3 cm, permitiendo una alimentación uniforme y una desintegración más eficiente (Lámina 30). Las raíces trituradas se conducen por un elevador de rosca helicoidal a un alimentador/dosificador que permitirá la distribución de la cantidad programada a un desintegrador; este es un cilindro rotativo que funciona a alta velocidad periférica, con láminas dentadas en la superficie que rallan la yuca causando el rompimiento celular y la consecuente liberación del almidón (Lámina 31).

La masa rallada es una mezcla de yuca rallada/agua que es bombeada a las tamizadoras o extractoras cónicas rotativas para retirar la fibra del almidón. Estos extractores son montados en baterías con la finalidad de aumentar el rendimiento. El agua entra en chorros a contracorriente para separar mejor el almidón (Lámina 32).

La suspensión extraída o lechada de almidón es alimentada a dos separadores centrífugos, uno primario y otro secundario, para las etapas de purificación y concentración, respectivamente. La lechada de almidón se alimenta a la centrífuga primaria de platos (Lámina 34) por medio de un tanque pulmón o de bombeo (Lámina 33) donde es purificada con la adición de agua y centrifugada para retirar los almidones solubles y partículas extrañas. Enseguida, la lechada de almidón purificada sigue a la etapa de concentración en la centrífuga secundaria (Lámina 35), donde el almidón es concentrado hasta 20-22 °Bé.

El agua removida del primer separador centrífugo es usada para la etapa de lavado, mientras que la del segundo es usada para el rallado o desintegración de las raíces (Sriroth *et al.*, 2000) y luego son canalizadas hacia la red de tratamiento de efluentes de la planta. Antes de pasar a los separadores centrífugos, para el proceso de purificación y concentración, el almidón puede ser pasado a través de filtros, los cuales consisten



EBS (2005)

Lámina 29
Inspección de raíces



EBS (2005)

Lámina 30
Triturador



EBS (2005)

Lámina 31
Desintegrador



Lámina 32
Tamizadoras o extractoras



Lámina 33
Tanque pulmón o de bombeo



Lámina 34
Centrifuga primaria

en hidrociclones para remover el contenido de arena. Estos filtros son comunes en Asia y frecuentemente encontrados en Brasil. La purificación y concentración son hechas por medio de separadores centrífugos.

El almidón concentrado es bombeado a un tanque especial de mezclado que posee un mecanismo de agitación que permite la mezcla constante del producto concentrado y evita su decantación; luego es bombeado a un separador. Existen dos sistemas para separar el agua del almidón en la lechada de almidón: por medio de un filtro de vacío o de una canasta centrífuga; el primero es adoptado por la mayoría de las empresas brasileñas y el segundo usado en China y Tailandia y se está incrementando su uso en Brasil. El filtro de vacío (Lámina 36) consta de una tela cilíndrica perforada cubierta por tejidos que se remueven cada ocho horas y la canasta centrífuga (Lámina 37), consta de un disco de gira a altas revoluciones. La ventaja de la canasta centrífuga es que permite obtener un producto con 33-35 por ciento de humedad, mientras que con el filtro de vacío se obtiene un producto con aproximadamente 45-48 por ciento de humedad. La disminución de la humedad reduce el consumo de energía durante la etapa de secado. Sin embargo, las canastas centrífugas son más costosas y consumen más energía (Sriroth *et al.*, 2000).

El almidón deshidratado al vacío sigue por una válvula rotativa que lo dosifica a un secador neumático. En todas las plantas modernas el almidón es secado en secadores neumáticos con corto tiempo de residencia y evaporación rápida del agua. (Lámina 38, parte superior). El almidón se conduce y seca por una corriente de aire caliente proveniente de una caldera. Las temperaturas en estos equipos varían entre 120-170 °C. Cuando se usan filtros de vacío el alto contenido de humedad en el almidón requiere bajas temperaturas con largos períodos de secado, para prevenir la

gelatinización del almidón. Para reducir el período de secado con altas temperaturas es conveniente mezclar almidón húmedo con almidón seco. En Tailandia las fábricas trabajan a altas temperaturas durante períodos reducidos ya que usan canastas centrífugas. La separación del aire y almidón es hecha en ciclones ya que el 37,5 por ciento del almidón es perdido en la etapa de secado, pero es recuperado por los ciclones con lo cual la pérdida de almidón disminuye a 2,7 por ciento.

El almidón seco en forma de polvo con una humedad entre 12-13 por ciento y una temperatura media de 58 °C es transportado a un silo (Lámina 38, parte inferior) el cual tiene la función de enfriar y almacenar temporalmente el almidón resultante del proceso

que será conducido posteriormente a la etapa de envasado. Si se almacenara el producto que sale del secador «flash» a una alta temperatura con humedad residual, la humedad del almidón se condensará en el silo de almacenamiento produciéndose la gelatinización del almidón, la formación de grumos y un aumento de la población microbiana.

Los secadores «flash» usados en varios países presentan diferencias en su funcionamiento. Las plantas de Brasil usan sistemas de ventilación de presión positiva, en cambio las de China y Tailandia usan presión negativa, con el ventilador colocado al final del secador, permitiendo una reducción de la pérdida de almidón y menor consumo de energía en el proceso de secado. Además, las fuentes de energía utilizadas son diferentes; en Tailandia generalmente se usa aceite, en Brasil madera y en China carbón.

Los efluentes del proceso son dispuestos para tratamiento; el agua que sale de la extracción es conducida para su purificación y la pulpa resultante es canalizada a un silo de almacenamiento para ser usada en húmedo o ser secada (Lámina 39).

Una vez secado y enfriado el almidón es tamizado para remover las partículas grandes y luego es transportado por alimentadores helicoidales a una envasadora automática. Para minimizar la pérdida de almidón durante el envasado y prevenir explosiones producidas cuando hay mucha concentración de almidón super seco en el aire (< 10 por ciento de humedad) es recomendable usar sistemas que permitan eliminar las cargas eléctricas estáticas en la salida del silo y en la entrada a la envasadora (Vilpoux, 2004). El almidón es envasado en sacos multipliego de papel con capacidad de 10, 25 y 50 kg que se pueden movilizar «a hombro». Algunas compañías también usan grandes bolsas de 800 a 1 000 kg que deben ser transportadas con medios mecánicos.

USO Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN

Los residuos obtenidos en la producción de almidón de yuca pueden ser clasificados en dos categorías, a saber: sólidos que incluyen la fibra, la cascarilla de la yuca y la mancha



EBS (2005)

Lámina 35
Centrífuga secundaria



VILPOUX (2004)

Lámina 37
Canasta centrifuga



VILPOUX (2004)

Lámina 36
Filtro de vacío



EBS (2005)

Lámina 38
Secador «flash» y silo de enfriamiento



EBS (2005)

Lámina 39
Silo de almacenamiento de fibras

y líquidos como las aguas residuales de las etapas de lavado, filtrado y sedimentación o deshidratación.

La cascarilla puede ser usada como fertilizante, en la alimentación animal mezclada con otros productos de la yuca o como sustrato en el cultivo de hongos o setas comestibles.

La fibra, subproducto de la operación de filtrado, se usa como complemento de concentrados para animales o se da directamente como alimento animal. Este material contiene una humedad entre 85-90 por ciento, cuya materia seca contiene 12-14 por ciento de fibra cruda, 2 por ciento de grasa y 2,5 por ciento de proteína (Buitrago, 1990). En Brasil, la fibra es pasada a través de un filtro prensa muy efectivo para disminuir la humedad desde un contenido de 90 hasta 40 por ciento; en otras plantas la fibra es secada en hornos similares a los utilizados en la producción de harina de yuca. En este último caso, la fibra seca es vendida como floculante en la industria minera. En Tailandia, la fibra es secada en los pisos de concreto donde la yuca es recibida o donde secan los trozos o astillas y es mezclada con los trozos en la producción de peletizados para la alimentación animal o es usada por algunas empresas como materia prima para la producción de ácido cítrico (Vilpoux, 2004).

La mancha obtenida luego del proceso de sedimentación, contiene almidón de baja densidad, 95 por ciento de humedad y su materia seca contiene 4 por ciento de proteína y 1 por ciento de grasa; generalmente se utiliza en la alimentación de porcinos (Buitrago, 1990).

El proceso de extracción de almidón de yuca consume grandes volúmenes de agua. En las tecnologías a escala artesanal o medianamente mecanizadas se consumen alrededor de 7-10 m³ de agua por tonelada de yuca (Alarcón y Dufour, 1998). Las tecnologías modernas consumen alrededor de 5-6 m³ por tonelada de yuca (EBS, 2005).

Por lo común, el agua utilizada en el proceso de extracción de almidón proviene de manantiales, por lo regular tiene un bajo contenido de minerales, o agua de pozos profundos, la cual en comparación con el agua superficial está libre de materia orgánica y microorganismos; también se utiliza agua de lagos, ríos, quebradas y pozos superficiales, aunque esta última por lo general está contaminada con materia orgánica y microorganismos. Es recomendable, utilizar un filtro para el agua empleada en el proceso construido por capas de grava gruesa, grava fina y arcilla que reducen los minerales y sólidos en suspensión contenidos en las aguas.

Cuando se procesa yuca para la obtención de almidón, independientemente de que sean variedades dulces o amargas, el almidón obtenido no contiene residuo alguno de ácido cianhídrico porque este se disuelve totalmente en el volumen de agua que requiere el proceso y se separa así del almidón; por esta razón las aguas residuales de las etapas de filtrado y sedimentación contienen ácido cianhídrico en solución. Se ha estimado que el proceso de extracción genera una carga contaminante de cerca de 180 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por tonelada de raíces (Dufour *et al.*, 1996). Por ello, todas las tecnologías utilizadas para el proceso de extracción de almidón, deben realizar un tratamiento de las aguas efluentes del proceso y no contaminar las corrientes de agua.

El agua más contaminada es la obtenida del proceso de sedimentación o deshidratación y el agua obtenida en las otras etapas del proceso es más clara y requiere menos tratamiento. Esta última puede ser reciclada para lavar con ella las raíces de yuca, lo que aumenta la rapidez y la eficiencia de esta operación y del proceso en general, ahorrando así cerca del 17 por ciento del agua que consume todo el proceso de obtención de almidón.

La mayoría de las plantas de almidón de Tailandia y Brasil usan lagunas de sedimentación para el tratamiento de las aguas residuales. Un decantador puede ser útil en el tratamiento del agua de lavado, principalmente en el tratamiento anaeróbico con recuperación de biogás. En este caso, el tratamiento puede ser básicamente hecho con aguas diluidas, lo cual decrece el volumen de reacción en el tanque e incrementa la eficiencia y por lo tanto reduce la inversión. Se ha estimado que el biogás obtenido por el tratamiento de las aguas puede suplir hasta un 75 por ciento la energía necesaria para un proceso de secado de almidón indirecto y hasta un 100 por ciento de la energía si el proceso de secado es directo y que el biogás no libere ningún residuo durante su combustión (Vilpoux, 2004).

