UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del efecto del tipo de fermentador sobre las características de calidad del almidón agrio de yuca (*Manihot esculenta Crantz*)

Carmen Cecilia Usuga Ortiz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos
Medellín, Colombia
2017

Evaluación del efecto del tipo de fermentador sobre las características de calidad del almidón agrio de yuca (*Manihot esculenta Crantz*)

Carmen Cecilia Usuga Ortiz

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

Angel Giraldo Mejía Ph. D

Codirector:

Diego Alonso Restrepo Molina M. Sc

Línea de Investigación:

Caracterización de Almidón

Grupo de Investigación: GICTA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Departamento de Ingeniería Agrícola y de Alimentos

Medellín, Colombia

2017

Agradecimientos

A continuación, quiero agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

A mi esposo y mi mamá por su amor, paciencia y apoyo en todo momento.

A los profesores asesores de la facultad de ciencias agrarias de la Universidad Nacional Angel Giraldo Mejía P y Diego Alonso Restrepo Molina por su guía y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Al profesor de estadística Guillermo Correa por la evaluación estadística de los datos.

A los evaluadores Edith Marleny Cadena Chamorro y Julián Alfredo López Tenorio por la revisión y sugerencias para mejorar el análisis de este trabajo.

A Jose Manuel Trujillo Representante de cooperativa agraria de productores de yuca y rallanderos del Cauca, por su apoyo en el seguimiento de la metodología de producción del almidón agrio y el suministro de las muestras.

Al laboratorio del instituto de química QUIREMA, por su colaboración con los análisis de SEM e IR. A los laboratorios de Farinología, Análisis Químico y Bromatológico y Control y Calidad de Alimentos de la Universidad Nacional, por el apoyo en los análisis fisicoquímicos y funcionales.

A la Distribuidora DISMAPAN por su aporte en el conocimiento del mercado del almidón agrio de yuca. A la rallandería Todoyuca, por la producción del almidón agrio en estudio.

Al proyecto de la (Convocatoria del programa nacional de apoyo a estudiantes de posgrado para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación de la universidad nacional de Colombia 2013-2015) código 28680.

Resumen general

En diferentes regiones de Colombia el *pan de yuca, pan de bono, almojábanas, pan de queso, rosquillas, besitos, carimañolas, enyucados y buñuelos* son productos de panadería de alta aceptación entre los consumidores; cuya base de preparación es el almidón agrio de yuca.

El almidón agrio de yuca se obtiene mediante reacciones de hidrólisis ácida parcial del almidón nativo, ocasionadas por la actividad enzimática de microorganismos amilolíticos propios del proceso de fermentación anaerobia al cual es sometido. Después de que es secado al sol su estructura se modifica, adquiriendo propiedades funcionales nuevas que son de utilidad para la industria panadera.

En Colombia la producción de almidón agrio de yuca se realiza por la vía húmeda mediante tecnología no industrializada, en pequeñas y medianas agroindustrias rurales conocidas como rallanderías concentradas en el departamento del Cauca. Las raíces de yuca que utilizan como materia prima provienen de diferentes regiones del país o cuando hay escasez de materiales procedentes de otros países.

Debido a la variabilidad en las características de la materia prima que utiliza y al poco control en las etapas de proceso, el producto que se obtiene presenta elevada heterogeneidad en su calidad lo que ha limitado su acceso a otros mercados más exigentes.

A pesar que en sus procesos las rallanderías poseen etapas relativamente semejantes, la variabilidad en los equipos y condiciones de operación ha conducido a clasificarlas en varios niveles según el tipo de tecnología que posean. Una de las variaciones presentadas en el procesamiento del almidón de yuca ocurre en la etapa de fermentación; en esta se utilizan fermentadores de diferente tamaño, geometría y material de fabricación, lo que cambia las condiciones ambientales para la población microbiana y por lo tanto la capacidad del proceso para obtener un producto de baja variabilidad en su calidad.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos tipos de fermentadores previamente instalados y en operación rutinaria en una rallandería de almidón agrio de

yuca, operada bajo condiciones consideradas como no estandarizadas ni industrializadas, sobre la calidad del almidón agrio de yuca.

Este informe está distribuido en dos capítulos. El primero se refiere al estado del arte del almidón en general para luego enfocarse en el almidón agrio de yuca. El segundo presenta los resultados de la evaluación de la calidad fisicoquímica y funcional del almidón agrio de yuca procedente de dos fermentadores de uso común en una rallandería típica de Colombia.

Palabras clave: Almidón nativo de yuca, Almidón agrio de yuca, análisis funcional, propiedades fisicoquímicas.

Abstract

In different regions of Colombia the *pan de yuca, pan de bono, almojábanas, pan de queso, rosquillas, besitos, carimañolas, enyucados y buñuelos* are bakery products of high acceptance among the consumers whose base of preparation is the starch of cassava.

Cassava sour starch is obtained by acid reactions and partial hydrolysis of the native starch caused by the enzymatic activity of amylolytic microorganisms characteristic of an anaerobic fermentation process, which after drying the sun modify its structure conferring functional properties than native starch did not possess and are useful to the baking industry.

In Colombia, cassava sour starch production is carried out by means of non-industrialized technology in small and medium-sized rural agro-industries known as *rallanderías* concentrated in the department of Cauca. Cassava roots used as feedstock come from different regions of the country or when there is a shortage of materials from other countries.

Due to the variability in the characteristics of the raw material used and the little control in the processing stages, the product obtained has a high degree of heterogeneity in its quality, which has limited its access to markets that demand characteristics of high and homogeneous quality.

Although in their processes the *rallanderías* have relatively similar stages, the variability in the equipment used to carry out its operations and in some components of the process has led to classify them in several levels according to the type of technology that they possess. One of the variations presented in cassava starch processing occurs in the fermentation stage; In this one they use fermenters of different size, geometry and material of manufacture, what changes the environmental conditions for the microbial population and therefore the capacity of the process to obtain a product of low variability in its quality.

The study, which is part of this report, was carried out with the objective of evaluating the effect of two types of fermenters installed in a *rallandería* of cassava sour starch, operated under commercial conditions considered as non - standardized or industrialized, on the quality of starch Cassava sour.

This report is divided into two chapters. The first refers to the state of the art of various aspects generally related to starch and in particular to cassava sour. The second presents the results of the evaluation of the physicochemical and functional quality of the cassava starch from two fermenters commonly used in the *rallanderías* of Colombia.

Key words: Cassava native starch, Cassava sour starch, functional analysis, physicochemical properties.

Contenido

Resumen general V
Lista de figuras X
Lista de tablas XI
Introducción 13
Referencias 18
Capítulo I 21
1.1 Características fisicoquímicas del almidón 22
1.2 Características funcionales del almidón 24
1.3 Características nutricionales del almidón 26
1.4 Modificaciones del almidón 32
1.5 Modificaciones del almidón de yuca 36
1.5.1 Obtención de almidón agrio de yuca 37
1.5.2 Caracterización del almidón agrio de yuca 43
Conclusiones de capítulo 46
Referencias 48
Capítulo II 55
2.1 Introducción 60
2.2 Metodología 62
2.3 Resultados y discusión 67
2.3.1 Selección del proveedor de almidón agrio de yuca 67
2.3.2 Evaluación fisicoquímica del almidón seleccionado 71
Conclusiones de capítulo 86
Referencias 88

Lista de figuras

Figura 1-1 Perfil de hinchamiento de almidones de diferentes orígenes. Almidón de papa (círculos rellenos), almidón de trigo (círculos abiertos), almidón de maíz (triángulos). Adaptado de (Eliasson, 1985; Eliasson, 1986). 25
Figura 1-2 Perfil de glucosa en sangre de alimentos con diferente IG. 28
Figura 1-3 Fotografías de dos rallanderías y tipos de fermentadores utilizados en la obtención de almidón agrio de yuca. Arriba, rallandería en el Departamento de Sucre y abajo rallandería en el Departamento de Cauca. Izquierda tanque de cemento y derecha tanque plástico enterrado. 39
Figura 1-4 Diagrama del proceso de obtención del almidón agrio de yuca en el nivel de una rallandería. 40
Figura 2-1 Curva de calibración utilizada para la determinación de amilosa y amilopectina en el almidón de yuca 64
Figura 2-2. Valores de humedad, pH y acidez para las muestras de almidón agrio de yuca de tres marcas comerciales. 68
Figura 2-3 Perfiles del poder de hinchamiento del almidón agrio de yuca procedentes de tres firmas comerciales 70
Figura 2-4 Fotografías de muestras de almidón de yuca sometidas al proceso de horneo conducente a la evaluación de la capacidad de expansión. Almidón nativo (arriba), almidón agrio de fermentador de cemento (medio), almidón agrio de fermentador plástico (inferior) 74
Figura 2-5 Comportamiento de la capacidad de expansión para cada repetición de las muestras de almidón nativo y agrio de yuca (TC = tanque de cemento y TP= tanque plástico). 76
Figura 2-6 Imágenes SEM a diferentes magnificaciones de las muestras de almidón nativo (a) y agrio de yuca (b, c y d) procedentes del fermentador plástico. 80
Figura 2-7 Espectros FTIR de las muestras de almidón nativo y agrio de yuca procedente de dos tipos de fermentadores (TC = tanque de cemento; TP= tanque plástico). 81
Figura 2-8 Región de ordenamiento estructural para las muestras de almidón nativo y agrio de yuca originado en los dos fermentadores (TC = tanque de cemento; TP= tanque plástico). 83
Figura 2-9 Espectro deconvolucionado de la región de ordenamiento estructural del almidón agrio de yuca procedentes del fermentador de plástico. 84

Lista de tablas

Tabla 1-1 Estudios de análisis de digestión enzimática del almidón in vitro ---------- 31
Tabla 1-2 Clasificación de almidones de acuerdo con el tratamiento de modificación utilizado---------- 33
Tabla 1-3 Formulaciones de panificación experimental para la evaluación de poder de expansión. ---------- 43
Tabla 1-4 Especificaciones de calidad de fichas técnicas de almidón agrio de yuca de diferentes productores---------- 45
Tabla 2-1 Soluciones estándar de la mezcla amilosa amilopectina para la curva de calibración. ---------- 64
Tabla 2-2 Datos de identificación de almidón agrio de yuca por Marca ---------- 67
Tabla 2-3 Propiedades físico-químicas y funcionales de los tratamientos del almidón de yuca---------- 71
Tabla 2-4 Coeficiente de correlación entre Amilosa y capacidad de expansión y Amilosa e ISA---------- 77

Introducción

En diferentes regiones de Colombia el *pan de yuca, pan de bono, almojábanas, pan de queso, rosquillas, besitos, carimañolas, enyucados y buñuelos* son productos de panadería de alta aceptación entre los consumidores cuya base de preparación es el almidón agrio de yuca.

El almidón agrio de yuca se obtiene mediante reacciones ácidas y de hidrólisis parcial del almidón nativo ocasionadas por la actividad enzimática de microorganismos amilolíticos propios de un proceso de fermentación anaerobia, que luego de un secado al sol modifican su estructura (Alarcon, 1998), confiriéndole propiedades funcionales que el almidón nativo no poseía que son de utilidad para la industria panadera.

En Colombia la producción de almidón agrio de yuca se realiza por la vía húmeda mediante tecnología no industrializada, en pequeñas y medianas agroindustrias rurales conocidas como rallanderías (Alarcon,1998), concentradas en el departamento del Cauca (aproximadamente 210), con capacidad de procesamiento de 53000 ton de raíces de yuca al año aproximadamente, generando alrededor de 11000 ton/año de almidón agrio de yuca (lo que representa una eficiencia cercana al 20%) y representando el 80% de la producción total del país (Sandoval, 2002). Sandoval *et al* (2006) informaron que en general en Colombia el almidón agrio de yuca se produce a partir de las raíces producidas en las diferentes regiones donde se encuentran las rallanderías, pero cuando hay escasez de material se compra almidón de yuca procedente de Tailandia o Ecuador. En el Brasil existe un producto parecido al almidón agrio de yuca, denominado "*polvilho azedo*", que se obtiene mediante un proceso de fermentación.

Las rallanderías utilizan etapas generales parecidas, pero exhiben diferencias en puntos claves del proceso. Como en las regiones se presentan problemas de suministro las plantas productoras reciben yucas de diferente origen; además la maquinaria y el procesamiento difieren dependiendo de su nivel tecnológico (Gottret *et al*., 2003), no tienen definidos los parámetros de control de la producción (Aquino *et al*., 2013) y por

tratarse de un proceso con fermentación espontánea natural se realiza sin asepsia (Gómez *et al*., 2016), encontrándose incluso microorganismos patógenos en sus etapas de producción lo que evidencia la necesidad de adoptar buenas prácticas de manufactura (BPM) (Chiquiza *et al*., 2016). La sumatoria de estas condiciones conduce a calidades variables del almidón agrio de yuca, incluso dentro de un mismo productor y con yucas del mismo origen (Aquino *et al*., 2013).

Otras limitaciones además de inocuidad y calidad variable del proceso de obtención de almidón agrio de yuca es el elevado consumo de agua, con efectos ambientales no deseables tales como generación de aguas residuales con elevada carga orgánica, generación de olores principalmente en fermentadores en cemento.

El almidón de la yuca es extraído utilizando de 7 a 10 m^3 de agua por cada tonelada de yuca procesada (Alarcon, 1998), generando una carga contaminante de cerca de 180 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por tonelada de raíces (Dufour *et al*., 1996), por lo que el agua residual debe ser tratada antes de ser devuelta a los efluentes, tratamiento que no se da en las rallanderías de nivel bajo y medio y, por ello, causan contaminación de las diferentes fuentes de agua (Vidal *et al*., 2009). El proceso genera además residuos sólidos, como la fibra, la cascarilla y la mancha, los cuales se comercializan como fertilizantes y como materias primas en la elaboración de alimentos para animales (Aristizabal *et al*., 2007).

Para obtener la calidad funcional relacionada con la textura del producto obtenido, el almidón extraído se somete a una fermentación semi-sólida, en tanques estáticos, de diferentes dimensiones y diseños dependiendo de la disponibilidad de la rallandería (Ospina *et al*., 2002). No se utiliza inoculación con microorganismos, ni suplementación nutricional; únicamente el almidón de yuca como sustrato. Para mantener la condición anaerobia se coloca una capa de agua de 5 a 10 cm sobre la masa de almidón nativo. El tiempo de fermentación varía entre 45 y 60 días (Alarcon *et al*., 2002). Dependiendo del criterio empírico de punto final establecido por los rallanderos (González *et al*., 2001) y las condiciones climáticas de la zona; además, la carga microbiana de la fermentación dependerá de la microflora que traigan las yucas que entran al proceso. Las condiciones ambientales, así como el tipo de tanque que se utiliza en la fermentación, influyen en la

variabilidad de la carga microbiana de cada uno de los tanques y más cuando no se presentan condiciones específicas para favorecer o inhibir el crecimiento de ciertos microorganismos de interés (Chiquiza *et al*., 2016).

La calidad del almidón agrio de yuca se ha evaluado mediante características como la humedad, el pH, la acidez, el contenido de amilosa o algunas variables asociadas a su valor nutricional como lo es la liberación de glucosa en la sangre (Chung *et al*., 2008).

Desde el punto de vista funcional la principal característica de calidad del almidón agrio de yuca es su desempeño durante el horneo de los productos de panadería, ya que éste confiere a la masa propiedades de expansión, aumentando hasta en dos o más veces el volumen de la masa inicial sin necesidad de adicionar cualquier tipo de leudante (Marcon *et al*., 2009), dándole además suavidad y estructura alveolar.

Existen diferentes metodologías para evaluar el desempeño del almidón agrio de yuca durante el horneo. Algunos investigadores proponen que se realice con una receta estándar que incluye otros ingredientes como queso y grasa o uno de los dos; sin embargo, esta propuesta es limitada porque es difícil obtener el queso con la calidad estándar necesaria para que la expansión se atribuya solo al almidón agrio (Fernández *et al*., 2002). Otra metodología de evaluación de la expansión durante el horneo usa almidón con agua (Demiate *et al*., 2000; Maeda *et al*., 2001; Marcon *et al*., 2009; Tischer, 2004), la cual se considera de fácil aplicación en las rallanderías. En general estas metodologías difieren en la temperatura de horneo y el método de medición del volumen de expansión especifico. También se han realizado evaluaciones de correlación entre la medición directa de la capacidad de expansión con otras medidas que permitan predecir el comportamiento del almidón agrio de yuca durante el horneo (Alvarado *et al*., 2013). Una de ellas ha sido seguir los cambios en las propiedades reológicas medidas en el *rapid visco analyser* (RVA) o el viscoamilografo Brabender, que evalúan el comportamiento de la viscosidad de una disolución de almidón cuando se aplica cizalla y se varía la temperatura.

En Colombia el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) ha aprobado algunas Normas Técnicas Colombianas relacionadas con la yuca. Está la NTC1255 “Yuca para consumo humano”, la NTC2716 “Frutas, legumbres y hortalizas.

Yuca seca para consumo humano" y la NTC6066 "Productos de molinería. Almidón nativo de yuca", destinado al procesamiento ulterior en la alimentación humana. Pero no se dispone de una norma referida al almidón agrio de yuca.

Este estudio se realizó con el fin de evaluar los efectos del tipo de fermentador sobre las características físicas, químicas y funcionales del almidón agrio de yuca obtenido mediante un proceso operado bajo condiciones consideradas como no estandarizadas en una rallandería del Departamento del Cauca (Colombia). Para lograr este fin se evaluaron dos tipos de fermentadores de cemento y plástico utilizados de manera rutinaria en una rallandería de un productor reconocido, caracterizado por tener un flujo constante de producción, por disponer de un proceso básico, no adicionar otros ingredientes al proceso de fermentación que modifiquen la naturaleza del almidón agrio obtenido. En el desarrollo del trabajo para cada tipo de fermentador (cemento y plástico) se realizó un muestreo a cuatro lotes de almidón agrio de yuca de la producción comercial y se usó como muestra control el almidón de yuca nativo sin modificación después de la extracción. Las variables estudiadas fueron humedad y otros materiales volatiles, pH, almidón total, amilosa, caracterización de la estructura utilizando infrarrojo (FTIR), análisis morfológico utilizando microscopia (SEM), variables funcionales tanto de calidad del proceso (índice de absorción de agua, índice de solubilidad y poder de hinchamiento) como de calidad del producto (capacidad de expansión durante el horneo).

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el efecto del uso de dos tipos de fermentadores (plásticos y de cemento) previamente instalados y en operación en una rallandería sobre las características fisicoquímicas y funcionales del almidón agrio de yuca.

Específicos

- Evaluar y comparar parámetros de calidad fisicoquímica, morfológica y funcional de almidones agrios de yuca, obtenidos en dos tipos de tanques fermentación previamente instalados y en operación en una rallandería.

- Evaluar el tipo de relaciones que se presentan entre las características fisicoquímicas.

Referencias

Alarcon, F. D. (1998). *Almidon agrio de yucca en Colombia. Tomo1: Producción y recomendaciones.* Cali: CIAT.

Alarcón, M., & Dufour, D. (2002). *Almidón agrio de yuca en Colombia Tomo 2*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Consorcio Latinoamericano para la Investigación y el Desarrollo de la Yuca; Proyecto IP-3 de Mejoramiento de Yuca.

Alvarado, P. M. Grosmaire, L., Dufour, D., Toro, A. G., Sánchez, T., Calle, F., Santander, M. A., Ceballos, H., Delarbre, J. L., y Tran, T. (2013). Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. *Carbohydrate polymers*, 98(1), 1137-1146.

Aquino, A. C. S., Pereira, J. M., Watanabe, L. B., & Amante, E. R. (2013). Standardisation of the sour cassava starch reduces the processing time by fermentation water monitoring. International. *Journal of Food Science & Technology*, 9(48), 1892-1898

Aristizábal, J., Sánchez, T., & Mejía-Lorío, D. J. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Chiquiza, L. N., Montoya, O. I., Restrepo, C., & Orozco, F. (2016). Estudio de la Microbiota del Proceso de Producción de Almidón Agrio de Yuca. *Información tecnológica*, 27(5), 03-14.

Chung, H. J., Liu, Q., Hoover, R., Warkentin, T. D., & Vandenberg, B. (2008). In vitro starch digestibility, expected glycemic index, and thermal and pasting properties of flours from pea, lentil and chickpea cultivars. *Food Chemistry, 111(2),* 316-321.

Demiate, I. M., Dupuy, N., Huvenne, J. P., Cereda, M. P., & Wosiacki, G. (2000). Relationship between baking behavior of modified cassava starches and starch

chemical structure determined by FTIR spectroscopy . *Carbohydrate Polymers, 42(2)*, 149-158.

Dufour, D., O´Brien, G. y Best, R. (1996). *Cassava flour and starch: progress in research and development*. Cali: CIAT.

Fernández, A., Zakhia, N., Ruiz, R., & Trujillo, J. M. (2002). *Desarrollo de un método sencillo para medir la calidad del almidón agrio de yuca: impacto del método sobre la agroindustria rural en el departamento del Cauca (Colombia).* Cauca.

Gomez A., Niño L., Romero A. M., Pineda A. M., Real P.A., & Rodriguez, M. E. (2016). Physicochemical transformation of cassava starch during fermentation for production of sour starch in Colombia. *Starch-Stärke*, 68(11-12), 1139-1147.

Gonzalez, L.; Arevalo, S. (2001). Fabricación del polvillo ácido a partir del almidón de yuca. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*.1(1), 49-53.

Gottret, M., Henry, G., & Dufour, D. (2003). *Caracterización de la agroindustria de procesamiento de almidón agrio en el departamento del Cauca. Colombia: proyecto de desarrollo de agroempresas rurales*. Palmira: Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 1255. Yuca para consumo. 1979.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 2716. Fruta, legumbres y hortalizas. Yuca seca para consumo humano. 1990.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 6066. Almidón nativo de yuca. 2014.

Maeda, K. C., & Cereda, M. P. (2001). Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 139-143.

Marcon, M. J. A., Kurtz, D. J., Raguzzoni, J. C., Delgadillo, I., Maraschin, M., Soldi, V., Amante, E. R. (2009). Expansion Properties of Sour Cassava Starch (*Polvilho Azedo*): Variables Related to its Practical Application in Bakery. *Starch/Stärke.* , 61(12) 716-726.

Ospina, B., & Ceballos, H. (2002). *La yuca en el tercer Milenio: Sistemas Modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Palmira: CIAT.

Sandoval, N. (2002). *Sistema agroalimentario localizado de producción de almidón agrio de yuca en el departamento del Cauca – Colombia*. Palmira: Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Sandoval, V., & Ruiz, R. (2006). El rol de los recursos locales en la evolución de la agroindustria rural del almidón agrio de yuca en el departamento del Cauca, Colombia. *Agroalimentaria*, 12(22).

Tischer, I. M. (2004). Influencia de la localización del almidón nativo de yuca en el canal de sedimentación sobre la calidad del almidón agrio. *Ingeniería y Competitividad*, 26-34.

Vidal, A. P., Lozada, P. T., & Leal, J. S. (2009). Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Optimización de variables ambientales y operacionales. *Dyna*, 76(160), 139-148.

Capítulo I

Generalidades de la investigación

El almidón es un carbohidrato complejo compuesto de dos estructuras poliméricas bien diferenciadas; la amilosa y la amilopectina formadas solo a partir de unidades de D-glucosa. Esta macromolécula de polisacáridos se encuentra formando gránulos empaquetados en capas, los cuales se almacenan en los cloroplastos de las hojas verdes y en los amiloplastos de semillas, tubérculos y raíces (Ellis, 1998). El almidón se puede extraer de cereales como el maíz, arroz y trigo, de leguminosas como el frijol, haba y guisantes, de tubérculos como la papa y la yuca, y de algunas frutas tropicales como el banano en su fase inicial. El maíz, la principal fuente industrial de almidón, representa más del 70% de la producción mundial (Bertolini, 2010). Sin embargo, actualmente el mercado del almidón de yuca ha crecido debido a que sus características funcionales lo hacen competitivo y es el segundo más comercializado en el mundo después del de maíz con una producción mundial de su forma nativa en el 2010 de 8 millones de toneladas (http://www.starch.dk/isi/stat/img/RawMaterialPieNative.gif). En el 2016 Colombia importó 15,094 Ton de almidón de yuca, de las cuales 10,000 ton procedían de Paraguay representando un 77% de la importación el resto era de origen de Brasil, Ecuador, Tailandia y USA. (http://www.trademap.org)

El almidón de yuca es conocido con otros nombres dependiendo de la región: almidón de tapioca en la India y Malasia, mandioca en el Brasil. En Europa y USA a la raíz se le conoce como *cassava* y a las harinas procesadas de la yuca se les nombra *tapioca* (Breuninger, 2009). El rendimiento del proceso de extracción se ha reportado mayor al 80% (Zhu, 2014). La industria de alimentos lo utiliza por sus propiedades funcionales y

características físicas como alta pureza, sabor neutro, fácil hinchamiento y solubilización, alta viscosidad, claridad de la pasta, baja retrogradación (Bertolini, 2010) y estabilidad a los ciclos de congelado/descongelado. Es usado también como ligante de agua, coadyuvante de emulsificantes, fuente de carbohidratos, espesante y texturizante de alimentos. La industria panadera local utiliza cerca del 10% de almidón nativo de yuca (sin procesamiento alguno) en la elaboración de *panderitos* y casi un 90% de almidón agrio de yuca (fermentado) para la elaboración de *pan de yuca, pan de bono, almojábanas, pan de queso, rosquitas, besitos, carimañolas, enyucados y buñuelos*. (Olazábal, 1980).

1.1 Características fisicoquímicas del almidón

El origen botánico del almidón define sus características estructurales y, por lo tanto, sus características funcionales. Entre las diferentes especies se dan diferencias en forma y tamaño el cual puede oscilar entre 2 y 100 µm (Kaur, 2007). En la papa los gránulos de almidón se clasifican de acuerdo con su tamaño en pequeños (tamaño <20 µm), medianos (entre 20 y 40 µm), grandes (entre 40 y 65 µm) y muy grandes (tamaño >65 µm). Generalmente los tubérculos presentan en mayor proporción gránulos grandes de forma esférica o elipsoide, mientras que en los cereales son más abundantes los gránulos pequeños y de forma poliédrica y en las leguminosas son de forma ovoide (Annison, 1994). Para Sandoval (2013) en el almidón de yuca el tamaño de los gránulos puede variar entre 2,5 y 28 µm.

La composición del almidón es principalmente amilosa y amilopectina. Dependiendo del alimento estos componentes pueden variar en sus proporciones. A pesar que es igual el monómero que compone estos polímeros, estos difieren en su estructura. Mientras que la amilosa tiene un grado de polimerización que varía entre 1000 a 2000 Dalton con una estructura lineal formada por enlaces glicosidicos α-D-(1-4), con leves ramificaciones, la amilopectina está compuesta por cadenas de glucosa α-D-(1-4) altamente ramificadas en las posiciones α-(1-6) por cadenas cortas de D-glucosa (Bertolini, 2010), con un grado de polimerización de 50.000 a 500.000 (Slade, 2012). La mayoría de los almidones poseen más amilopectina que amilosa; de hecho, casi una cuarta parte del almidón está constituida por amilosa (Wang, 1998). Algunos almidones, como los de los cereales,

contienen poca amilosa, el almidón de las arvejas (*Pisum sativum*) posee un alto contenido de esta (superior al 70%). El almidón también presenta cantidades minoritarias de lípidos, proteínas, grupos fosfatos, iones de calcio y magnesio.

El gránulo de almidón presenta una naturaleza semicristalina debido a la presencia de regiones amorfas y regiones cristalinas pequeñas intercaladas en capas que parten desde un núcleo llamado *hilum* hacia la superficie formando un arreglo radial de anillos concéntricos (Miao, 2014). Esta organización macromolecular hace que el almidón presente la propiedad de la birrefringencia (formando un patrón llamado “cruz de malta” cuando el almidón se observa bajo luz polarizada). También puede evidenciarse su estructura por rayos X con la observación de ciertos patrones de repetición (Barsby, 2001). Se puede conocer el carácter cristalino del almidón usando esta técnica, el cual varía entre 15 y 45%, siendo el resto una estructura amorfa (Annison, 1994). En el almidón la presencia de regiones cristalinas se debe principalmente a la amilopectina (Bertolini, 2010), en la que sus cadenas cortas externas se asocian por *clusters* de doble hélice para formar dominios cristalinos (Tester, 2004), hecho que ha sido evidenciado con estudios de difracción de rayos X en almidones céreos (bajo contenido de amilosa) que presentan el mismo patrón de difracción de un almidón típico, indicando que la cristalinidad del almidón se debe mayoritariamente a la amilopectina (Imberty, 1988).

Con el uso de la difracción de rayos X en almidones nativos se han identificado distintos tipos de arreglos cristalinos definidos por la forma y la densidad de empaquetamiento del gránulo de almidón, el cual depende de la longitud de la cadena de amilopectina y de la cantidad y tipo de asociación del agua dentro del cristal. Basado en su espectro difractométrico se han clasificado estos patrones de cristalización característicos en diferentes tipos a saber: tipo A (presente en cereales), tipo B típico de tubérculos (Imberty, 1988), una mezcla de los patrones tipo A y tipo B, denominado tipo C en el cual no se distingue un arreglo en particular en la estructura del cristal generalmente presente en almidones de leguminosas (Gernat, 1990). Otro arreglo cristalino es el tipo V (estructura cristalina asociada a la interacción de la hélice de amilosa con lípidos). Este tipo se da cuando se pierden los patrones de difracción tipo A y B por acción del calor en

presencia de la humedad como ocurre con los almidones gelatinizados y ocasionalmente en almidones nativos con contenidos de amilosa superiores a 30% (Annison, 1994).

1.2 Características funcionales del almidón

En su forma natural el almidón, denominado nativo, es una partícula que en solución acuosa produce una suspensión o dispersión debido a su poca solubilidad en el agua fría. Para obtener una mezcla homogénea, la industria de alimentos utiliza tratamientos hidrotérmicos. Con la aplicación de agua y calor se busca obtener características de textura y consistencia deseadas sujetas al comportamiento hidrocoloidal de cada almidón, el cual dependerá de su origen, tamaño, proporción y organización molecular de la amilosa y la amilopectina. El conocimiento de estas características ha permitido que se utilice el almidón como materia prima con diferentes propósitos: espesar, gelificar, dar consistencia, controlar o modificar la textura, estabilizar geles y suspensiones, elemento ligante, absorbente de agua, agente de relleno, formación de masas (Eliasson, 2006).

El almidón sufre una transformación estructural irreversible cuando es sometido a temperaturas superiores de 50°C en presencia de exceso de agua (o sea en proporciones de agua almidón mayores de 1,5); esta transformación se caracteriza por las siguientes etapas: transición vítrea, gelatinización, hinchamiento, empastado y retrogradación (Dona, 2010). Durante este proceso ocurren dos transiciones de fase: la vítrea (Tg) de la región amorfa y la fusión de la región cristalina (Tm) (Huang, 1994). Estos eventos térmicos son claves para el control de las funciones del almidón ya que las demás etapas son afectadas por dichos eventos. La Tg y la Tm son moduladas por la cantidad de agua adicionada en el proceso; es decir, a mayor humedad menor Tg y consecuentemente menor Tm (Eliasson, 2004). En general los cambios térmicos de los almidones comienzan con la absorción lenta de agua en las zonas intermicelares amorfas que son más accesibles; cuando se alcanza la temperatura de transición vítrea (Tg) se hace suave y gomosa.

Cuando la temperatura es superior a los 60°C el gránulo de almidón absorbe cantidades considerables de agua hinchándose varias veces su volumen original, perdiendo su

orden molecular y la organización radial de las cadenas de amilosa y amilopectina, produciendo rompimiento de la cristalinidad y, por ende, perdida de su patrón de difracción (Douzals, 1996) hecho que se puede deducir de la ausencia de birrefringencia (Bertolini, 2010). La amilosa se lixivia en la disolución aumentando la viscosidad de esta. Estas transformaciones físicas son irreversibles y ocurren en un intervalo específico de temperatura para cada almidón. Para el estudio de esta etapa generalmente se usa la técnica de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) en la cual en el termograma se puede detectar la pérdida de la cristalinidad del almidón en un evento endotérmico.

Sí una vez alcanzada la gelatinización continúa el calentamiento y la agitación, se lixivian más moléculas solubles, incluyendo la amilopectina, y los gránulos hinchados dan lugar a una masa viscosa. El estudio de este hinchamiento es importante para desarrollar propiedades funcionales como la capacidad de retención de agua y propiedades de la pasta. Una de las formas de seguir este fenómeno es midiendo el incremento en el volumen del gel de un almidón que ha sido sometido a un tratamiento hidrotérmico. La Figura 1-1 registra algunos valores de hinchamiento de almidones de diferentes orígenes.

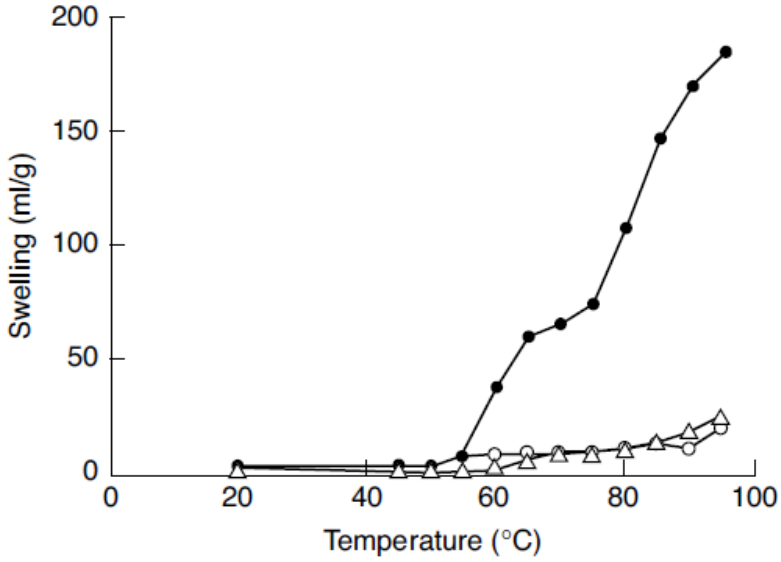

Figura 1-1 Perfil de hinchamiento de almidones de diferentes orígenes. Almidón de papa (círculos rellenos), almidón de trigo (círculos abiertos), almidón de maíz (triángulos). Adaptado de (Eliasson, 1985; Eliasson, 1986).

En la figura se observa que frente a los cambios de temperatura cada almidón tiene comportamientos de hinchamiento diferentes. La temperatura de empastado es aquella que produce un rápido incremento de la viscosidad del almidón (Dona, 2010).

Se puede seguir el perfil de viscosidad en función de la temperatura con un viscoamilografo, el cual registra la viscosidad de manera continua mientras se hace un ciclo de calentamiento y enfriamiento. En este estado el almidón no es estable. Sí continua el calentamiento y la agitación, se rompe la estructura del almidón en pequeños agregados produciendo la disminución de la viscosidad, la cual dependerá a su vez de la acidez y la agitación del medio. Con temperaturas y presiones más altas puede ocurrir hidrolisis espontánea del almidón produciendo oligosacáridos (Miyazawa, 2006). Pero si ocurre enfriamiento el almidón sufre un lento proceso de reasociación, se eleva de nuevo la viscosidad, la amilosa y la amilopectina se unen por puentes de hidrógeno en un nuevo orden estructural y forman un producto de consistencia tipo gel. Cuando se deja en reposo las soluciones diluidas pierden viscosidad y las concentradas (pastas y geles) se tornan gomosas y exudan agua (sinéresis). Este proceso que se da sobre el almidón gelatinizado se conoce como retrogradación y su grado dependerá de la fuente botánica, la estructura molecular y el contenido de amilosa del almidón (Eliasson, 2006). Durante el almacenamiento no cesa la retrogradación, continúan las transformaciones estructurales originando una estructura más ordenada o cristalina cambiando sus propiedades reológicas, evidenciándose con el incremento de la firmeza o rigidez y la pérdida de la capacidad de retención de agua. El envejecimiento del pan y de los productos horneados son ejemplos de este estado del almidón (Wang, 2015).

1.3 Características nutricionales del almidón

Se conoce que en el proceso digestivo el almidón mediante hidrólisis se despolimeriza hasta glucosa proporcionando la energía que requieren el ser humano y los animales no humanos. Sin embargo, en los últimos años el almidón ha sido reconocido por muchas autoridades como un carbohidrato beneficioso en la alimentación humana. La Organización Mundial de la Salud, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos en su Programa de Nutrición del 2005, el Programa Nacional Francés de Nutrición y Salud Humana del 2006 al 2008, el Instituto Nacional Japonés de Salud y Nutrición y la

Fundación Británica de Nutrición recomiendan una ingestión diaria de 150 g de almidón (Colonna, 2010), considerando que la calidad nutricional de los alimentos aportadores de almidón no es igual, en virtud que presentan respuestas glicémicas específicas y por ello una vez consumidos elevarán en diferente medida el nivel postprandial de la glucosa en sangre (Parada & Rozowski, 2008).

La calidad nutricional de los almidones generalmente se mide por la cantidad de glucosa que producen en un tiempo específico (Nayak, 2014). Pruebas tradicionales como el índice glicémico (IG) proporcionan un valor numérico único que permite la clasificación de los almidones de acuerdo con la respuesta fisiológica postprandial que produzcan; esta prueba consiste en medir el aumento de la glucosa en el plasma sanguíneo de un individuo durante 2 horas a intervalos definidos, después de haber consumido un alimento de prueba que contiene 50 g del carbohidrato (Stacey, 2011). El IG se expresa en porcentaje relativo del aumento de la glucosa en sangre producido por un alimento evaluado con relación a un control (típicamente glucosa o pan blanco) (Jenkins, 2002).

En la Figura 1-2, tomada de Glycemic Index Foundation (http://www.gisymbol.com/about/glycemic-index/), se presentan los perfiles teóricos de la glucosa en sangre de dos alimentos que tienen diferentes IG.

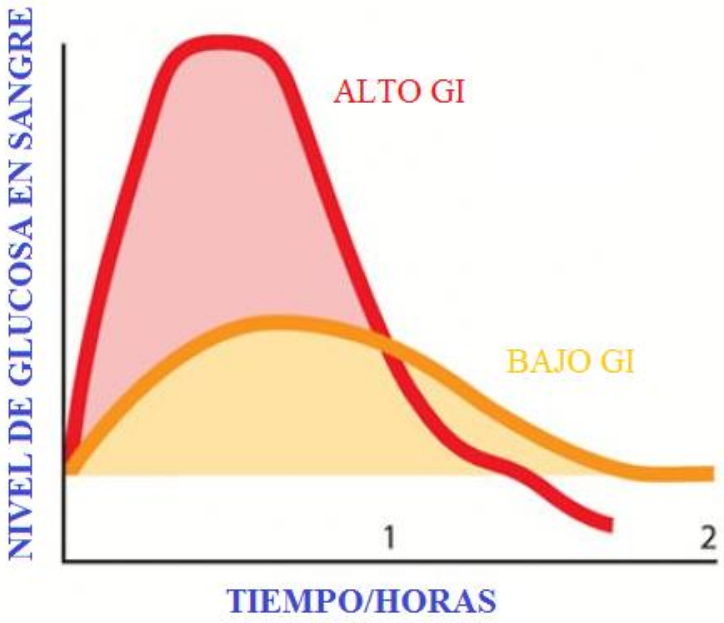

Figura 1-2 Perfil de glucosa en sangre de alimentos con diferente IG.

Al inicio de la prueba, cuando el individuo está en ayuno, el nivel de glucosa en sangre presenta un estado basal propio para cada individuo. Una vez se consume el alimento, durante el tiempo postprandial o de respuesta, se presenta un máximo de producción de glucosa que luego baja hasta el estado inicial. En los alimentos con altos IG aumenta durante más tiempo la cantidad de glucosa en la sangre que en aquellos que tienen bajos IG. En su estudio Ferng *et al* (2016) establecieron que el IG es bajo cuando se tienen valores menores que 60, en tanto que se consideran altos en aquellos IG superiores a 85.

La determinación del IG de un alimento se realiza *in vivo.* Se requiere de una muestra de individuos con atributos específicos (raza, genero, estado de salud) lo que hace la evaluación dependiente de las condiciones del sujeto evaluado (Dona, 2010); además es una prueba costosa, se requiere de infraestructura de laboratorio y los resultados son controversiales. Para superar estos inconvenientes se han propuesto las metodologías *in vitro* que son rápidas y reproducibles (Parada & Rozowski, 2008), centradas en los factores propios del alimento y no en las condiciones del individuo (Englyst, 1992). Estas metodologías permiten predecir la respuesta glicémica por medio de la correlación entre la cantidad y la velocidad de la digestión de los almidones con el IG (Goñi, 1997),

determinando su magnitud y duración (Han, 2007) e indicando la tendencia de la respuesta glicémica como alta, media o baja y no con un valor numérico (Gibson, 2011).

Englyst *et al* (1992) propusieron una metodología *in vitro* para la digestión de almidón (medida por la producción de glucosa en diferentes tiempos de incubación del almidón en una mezcla enzimática específica) que fue validada con estudios *in vivo* en sujetos con ileostomía y apoyada por distintos grupos de investigación debido a que presentó una correlación positiva con la prueba *in vivo* de respuesta glicémica (Englyst & Kingman, 1996). Con base en esta metodología el almidón se clasificó en rápidamente digestible (RDS), lentamente digestible (LDS) y almidón resistentes (RS). El almidón RDS corresponde a la cantidad de almidón que se hidroliza hasta glucosa en 20 min; LDS es la proporción de almidón digerido en 120 min y los RS son aquellos que no se hidrolizan con el tratamiento enzimático después de 2 horas de incubación, los cuales Englyst & Kingman (1996) los relacionó con la porción de almidón o productos de la degradación de éste que no son absorbidos en el intestino delgado.

De acuerdo con el origen de la resistencia a la digestión para los RS en particular Englyst (1992) definió la existencia de cuatro categorías:

- RS1. Resistencia debida a inaccesibilidad física por efectos de envoltura del almidón como granos parcialmente molidos y semillas enteras.
- RS2. Resistencia debida al alto grado de compactación de la estructura del gránulo que no deja penetrar las enzimas como sucede por ejemplo con los gránulos sin gelatinizar, con cristalinidad parcial, el almidón crudo, papas crudas y plátanos verdes, algunas legumbres y maíz alto en amilosa.
- RS3 por retrogradación. Existe en alimentos con ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento como se presenta en el pan o las papas cocidas y enfriadas.
- RS4 por modificaciones químicas.

Los carbohidratos no digestibles tienen alto potencial para modular la digestión y la absorción de la glucosa; por ende, controlan los efectos postprandiales del alimento (Eliasson, 2004). El comité conjunto de la FAO/OMS (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Organización Mundial de la Salud) concluyó con base en estudios de aplicación terapéutica que los alimentos con bajo IG presentan múltiples beneficios para la salud como la reducción de la respuesta postprandial de

glucosa e insulina en sangre previniendo el riesgo de diabetes no insulinica; además que los alimentos con carbohidratos con bajos valores de digestibilidad generalmente es menor el IG que en aquellos con alto IG (FAO/OMS. 1998). Aunque todos los almidones lentamente digestibles (LDS) tienen bajo IG, no todos los alimentos con bajos IG son ricos en LDS (Han, 2007).

La metodología *in vitro* simula parcialmente el proceso de la digestión de un alimento, mediante el uso de diferentes preparaciones enzimáticas con una medición posterior de la glucosa liberada después de un tiempo específico. En humanos en el proceso digestivo del almidón actúan seis enzimas: dos tipos de α-amilasas (salival y pancreática) que actúan como endohidrolasas rompiendo los enlaces glicosídicos internos α-D(1-4) y cuatro tipos de α-glucosidasa intestinal, exohidrolasas que liberan monómeros o dímeros del extremo no reductor de la molécula sustrato. El fraccionamiento parcial del almidón comienza en la boca con la participación de la α-amilasa salival que lo convierte a oligosacáridos, pero se inactiva y degrada cuando llega al ambiente ácido del estómago. La hidrólisis de los carbohidratos del alimento continúa en el intestino delgado con la liberación de la α-amilasa pancreática que los transforma en maltosa y dextrinas ramificadas, las cuales son hidrolizados a glucosa por las enzimas maltosa-glucoamilasa e isomaltasa de los enterocitos de la membrana del borde de cepillo del intestino delgado (Kaur & Sandhu, 2013). La fracción del almidón o de productos de su digestión que no se convirtieron en glucosa en el intestino delgado son degradados por fermentación bacteriana en el intestino grueso y metabolizados a ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato y butirato) (Topping, 2001). Por lo tanto, el nivel y la velocidad de la hidrólisis del almidón determinarán el punto de absorción de este en el intestino.

Las metodologías para la evaluación de la digestibilidad *in vitro* usan diferentes preparaciones enzimáticas. Algunas contienen un solo tipo α-amilasa (monoenzimáticas), Otras son multienzimáticas que utilizan mezclas de enzimas tales como α-amilasa (Hódsági *et al*., 2012), amiloglucosidasa y pepsina entre otras (Englyst *et al*, 1992, Goñi *et al*, 1997). Estos métodos difieren en las condiciones de la hidrólisis como el pH, el número y tipo de enzimas y la actividad enzimática) (Hódsági et al., 2012). El seguimiento de la digestión se hace por medio de la velocidad de pérdida del almidón, aparición de glucosa o de algunos oligosacáridos. La Tabla 1-1, elaborada a partir de la

información consultada, presenta algunos estudios que utilizan metodologías enzimáticas *in vitro* para evaluar el efecto de varias variables sobre la digestión del almidón.

Tabla 1-1 *Algunos estudios in vitro de digestión enzimática del almidón*

Referencia	Fuente de almidón	Preparación enzimática	Resultado
Chung (2008)	Maíz modificado y nativo	α-amilasa pancreática	El almidón modificado mostró menor grado de hidrólisis que el no modificado
Dhital (2010)	Maíz y papa con diferentes tamaños de partícula	α-amilasa pancreática, pepsina y amiloglucosidasa	El almidón de maíz presentó mayor velocidad de digestión que el de papa debido a que su estructura presenta poros y canales lo que incrementa el área superficial y facilita la difusión de la α-amilasa.
Goñi (1997)	Alimentos ricos en almidón	α-amilasa pancreática y amiloglucosidasa	La hidrolisis del almidón es característica de cada producto. Los cereales mostraron mayor velocidad de digestión que las leguminosas Se observó buena correlación entre el método *in vitro* y el IG.
Ma (2017)	Leguminosas Frijol, garbanzos, lentejas crudas y cocidas	Extracto de pancreatina y amiloglucosidasa	El frijol tuvo mayor contenido de RS. El LDS y el RS fue más bajo en las lentejas cocidas que en las crudas

El nivel de la digestibilidad del almidón depende de factores intrínsecos relacionados con el alimento y de factores extrínsecos dependientes del individuo (masticación del alimento, tiempo de tránsito, concentración de amilasa en el intestino entre otros) (Englyst, 1992), lo que supone que cualquier barrera física o química en alguna de las etapas de la digestión reducirá su velocidad y por ende su absorción (Eliasson, 2004). Diversos factores intrínsecos afectan la digestión del almidón. Por ejemplo, la composición y el tamaño del almidón determinan la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática. Kaur *et al* (2007) reportaron que la proporción hidrolizada de gránulos de almidón de tamaños grandes fue menor comparada con la hidrólisis de gránulos medianos y pequeños. Otras variables como la proporción de amilosa/amilopectina, la

asociación del almidón con otros componentes como proteína o lípidos, la longitud de la cadena de amilosa y el grado de cristalinidad están relacionadas con las variaciones en la tasa de hidrólisis enzimática (Annison, 1994; Kaur, 2013). El tipo de cristalinidad, definido por el arreglo estructural de las regiones cristalinas y amorfas en el gránulo, también afectan el nivel y la velocidad de la hidrólisis enzimática. Debido a que a la estructura cristalina tipo A del almidón presenta mayor número de poros que facilitan la difusión de la enzima aumentando su hidrólisis los almidones nativos con patrones de difracción tipo B son más resistentes a la hidrólisis enzimática que los de tipo A (Cai, 2014).

Las condiciones de procesamiento de los alimentos, la fuente de almidón y la cantidad de amilosa también influyen en la digestibilidad de los almidones y, por consiguiente, en el contenido de RS, debido principalmente a los fenómenos de gelatinización y retrogradación (Haralampu, 2000). Otras razones intrínsecas por las cuales el almidón presenta resistencia a la digestión son el grado de compactación molecular y la protección de los gránulos por la pared celular que limita el acceso de las enzimas digestivas (Homayouni, 2014). En diversos estudios se han realizado modificaciones químicas con el fin de disminuir el nivel y la velocidad de la hidrólisis del almidón y obtener mayores cantidades de almidones resistentes del tipo RS4. Han (2007) y Van Hung (2017) introdujeron modificaciones químicas a almidones de maíz, papa y yuca con el objetivo de disminuir su digestibilidad. Por su parte Kasprzak *et al* (2012) utilizaron métodos enzimáticos para modificar almidones de diferentes orígenes con el fin de aumentar su resistencia a la digestión.

1.4 Modificaciones del almidón

En el procesamiento de alimentos se requieren almidones que cumplan diversas funciones: tolerancia al cizallamiento y la agitación, que soporten condiciones ácidas, altas temperaturas, estables a la congelación y descongelación o que tengan propiedades de expansión. Usualmente los almidones nativos presentan limitaciones para atender estas condiciones debido a sus débiles propiedades mecánicas, intervalos estrechos de viscosidad la cual desciende rápidamente por efecto del calor, la acidez y la tensión del proceso; tales características afectan el manejo, la textura (poco cuerpo,

fibrosos, pegajosos) y estabilidad del producto alimenticio (retrogradación, inestabilidad a condiciones ácidas y/o sinéresis, poca estabilidad al congelado/descongelado). Para controlar estos comportamientos no deseados y aumentar la tolerancia a estos procesos rigurosos, los fabricantes de alimentos usan almidones a los que se le han realizado cambios estructurales con fines específicos de funcionalidad; estas modificaciones son realizadas por medio de tratamientos físicos, químicos o enzimáticos o las combinaciones de éstos para obtener un mejor desempeño. Los almidones resultantes de estos tratamientos se conocen como almidones modificados. La FAO (2005) los definió como: *"almidones en los cuales una o más de sus características originales han sido alteradas por los tratamientos aprobados".*

Debido a la versatilidad que presenta el almidón para ser modificado existe gran variedad de ellos. Para seleccionar aquel que sería adecuado para una aplicación particular se debe considerar la textura, el almacenamiento, forma de preparación, vida útil, consideraciones organolépticas, el desempeño durante el proceso, viscosidad, resistencia al esfuerzo de la maquinaria (cizallamiento, mezclado, bombeo), bajo pH y altas temperaturas (Abbas, 2010).

En la Tabla 1-2 se presenta una clasificación de almidones modificados de acuerdo con el tipo de tratamiento realizado para su modificación y el uso potencial en la industria de alimentos. Para la elaboración de la tabla se utilizó la información consultada en la literatura.

Tabla 1-2 *Clasificación de almidones de acuerdo con el tratamiento de modificación utilizado*

Tratamiento	Modificación	Clases	Propiedades	Usos
QUIMICO	Entrecruzado	Di esteres de almidón	Tolerancia a pH ácidos, altas temperaturas y cizallamiento; resistente al ataque enzimático	Alimentos congelados, productos cárnicos, alimentos enlatados
	Sustitución Estabilización	Mono esteres de almidón Esterificación	Reduce retrogradación y sinéresis, estabilidad a los ciclos	Alimentos congelados, horneados, almacenados

			congelado/desconge lado, claridad del gel, mejora textura	por largos periodos, productos cárnicos
		Monoéteres de almidón Eterificación	Reduce retrogradación y sinéresis, estabilidad congelado/desconge lado, claridad del gel, estable a ácidos y bases	Alimentos congelados, almacenados por largos periodos
	Dextrinación	Dextrina blanca	Alimentos crugientes, varia viscosidad dependiendo del procesamiento, puede bombearse en caliente, solubilidad en agua, capacidad de formación de película	Cobertura de alimentos, sustituto de grasas en panadería y productos lácteos
	Conversión	Hidrólisis ácida o lintnerización	Reduce la viscosidad en caliente, permite usar el almidón en alto porcentaje, Claridad de la pasta, agente gelante	Dulces o alimentos con textura gelatinosa
		Oxidación medio básico	Claridad de pasta, Estabilidad de producto, proveen adhesión, crujencia	Recubrimientos de carnes y de pescado, uso en pastas y panadería
	Adición de otros grupos funcionales	Lípidos	Leve carácter hidrofóbico, Encapsulación y estabilización de emulsiones	Bebidas emulsionadas, cremas, aderezos para ensaladas
FISICO	Pregelatinización		Solubilidad en frio, Capacidad	Sistemas alimenticios

			espesante/gelante	instantáneos
	Molienda		Aumenta la absorción de agua, capacidad de hinchamiento y solubilidad, susceptibilidad a la hidrolisis enzimática	Espesantes de alimentos
	Gránulos solubles en agua fría (gcws)		Solubilidad en frio, Capacidad espesante/gelante, tolerancia al calentamiento, mejora textura	Alimentos instantáneos, alimentos para reconstruir en microondas
	Precocido Annealing		incrementa la temperatura de gelatinización y acorta el rango de temperatura de gelatinización	Espesantes de alimentos
	Calor húmedo		Aumenta la temperatura de gelatinización, y el rango de gelatinización	Pretratado para otra modificación
	Calor seco		Tolerancia pH ácidos, altas temperaturas y elevado cizallamiento	Pretratado para otra modificación
ENZIMÁTICO	Conversión enzimática	Hidrólisis Transferencia	Rompimiento de enlaces Rompimiento y formación de nuevos enlaces	Producción jarabes de glucosa o fructosa y maltodextrinas
	Conversión enzimática endógena	Fermentación y secado al sol	Compuestos oxidados Gránulos perforados Dextrinas diferentes DP Propiedades de	Almidón agrio de yuca

			expansión horneo	
INTERVENCIÓN GENETICA	Alteración de componentes	Aumento amilosa	Cocimiento a bajas temperaturas, fuerzas de gel, crujencia	Snacks fritos y extruidos
		Almidones céreos	Claridad de gel y cohesividad	

En general los tratamientos utilizados para modificar los almidones nativos caen en tres categorías: químicas, físicas o enzimáticas. A estos se debe agregar la intervención genética.

Los tratamientos químicos utilizan, en baja cantidad, sustancias químicas previamente aprobadas para su uso en alimentos para humanos. Estas sustancias introducen nuevos enlaces y sustituyentes que promueven la escisión, oxidación o arreglos moleculares (Bertolini, 2010). Los tratamientos físicos emplean procesos térmicos o hidrotérmicos que modifican la estructura cristalina y las propiedades granulares del sólido. En los tratamientos enzimáticos se generan reacciones químicas con productos específicos controlados y baja producción de subproductos. Por último, las intervenciones genéticas se orientan a la introducción de modificaciones en la relación amilosa y amilopectina.

1.5 Modificaciones del almidón de yuca

La producción de yuca en Colombia se concentra en ciertas épocas del año determinadas por la estacionalidad de las lluvias, lo que supone mayores tiempos de almacenamiento y complejidad en la operación ya que se trata de un producto agrícola perecedero (Sanchez, 2007). Tanto para consumo humano como para uso no alimenticio la yuca se comercializa en fresco y procesada. Con el fin de generar valor es transformada en almidón tanto a gran escala (200 Ton/día) como en el nivel artesanal (30Ton/mes) pudiéndose aumentar su valor por medio de diferentes modificaciones.

El almidón nativo de yuca puede modificarse por medios físicos y convertirse en almidón pregelatinizado. Zhu (2015) presentó una revisión en la que incluyó modificaciones químicas del almidón con beneficios en la funcionalidad como por ejemplo la reducción o

el aumento del volumen de hinchamiento, aumento de la claridad de la pasta, incremento de la suceptibilidad a la α amilasa.

En el nivel industrial las modificaciones enzimáticas del almidón de yuca están basadas en el uso de enzimas hidrolizantes como la α-amilasa, pululanasa y la glucoamilasa, con las cuales se obtienen productos como los hidrolizados del almidón, jarabes de glucosa, fructuosa o derivados de maltodextrinas (Van der Maarel, 2002). Otra modificación enzimática del almidón de yuca es la utilizada para obtener el almidón agrio de yuca, el cual se da por fermentación espontánea de enzimas amilolíticas provenientes de microorganismos propios del proceso, dando como resultado el aumento de ácidos orgánicos que forman una nueva estructura después de secarlo al sol (Sena, 2013). Esta modificación enzimáticamente es llevada a cabo por la acción fermentadora de bacterias lácticas amilolíticas en condiciones de anaerobiosis por medio de reacciones ácidas e hidrólisis parcial en el almidón de yuca nativo.

1.5.1 Obtención de almidón agrio de yuca

El almidón agrio de yuca es obtenido en el proceso de producción del almidón de yuca el cual es extraído por vía húmeda de las raíces de la yuca mediante el siguiente proceso general. En las rallanderías en el área de recepción los sacos con yuca de diferentes variedades se almacenan en un área cubierta. Luego la yuca pasa a la etapa de lavado y pelado mecánico mediante el uso de un tambor cilíndrico con salientes en su superficie que gira continuamente. Debido a la fricción entre la yuca y las paredes del motor la yuca se descascara. Los residuos de tierra, las cáscaras y las impurezas se eliminan con un chorro continuo de agua. La cascarilla de yuca, considerada como un subproducto, se usa como abono o para alimentación animal aprovechando que es fuente de carbohidratos solubles (Rosales, 1996). El agua residual desechada pasa a la planta de tratamiento.

En la etapa de molienda o rallado se utiliza un rallador constituido por bordes de múltiples agujeros que deshace el tejido de la raíz para separar los gránulos de almidón de las fibras produciendo una masa de ralladura de consistencia acuosa ya que continuamente hay aspersión con agua para limpiar el rallador. Esta masa es filtrada por un colador cilíndrico rotatorio de nailon que se lava continuamente con agua para separar el afrecho

de la lechada donde se encuentra el almidón disuelto. El tamaño del corte en el proceso de rallado determina la pérdida del almidón en el afrecho. Este producto es escurrido y secado para ser comercializado como alimento para animales. La lechada de la yuca es conducida hacia tanques o canales de sedimentación. En los tanques el proceso es más lento y de menor rendimiento, mientras que en los canales el recorrido de la lechada por los diferentes tramos hace que el gránulo de almidón se sedimente a mayor velocidad aumentando la eficiencia y disminuyendo las pérdidas. Al final de la etapa en los canales se forman tres capas: en el fondo se forma la capa de almidón sedimentado y compactado; sobre esta se deposita la mancha, una mezcla de almidón liviano con material proteico; por último, en la parte superior se forma la capa de agua con partículas en suspensión, la cual se puede filtrar para recuperar más mancha. El remanente pasa al depósito de aguas residuales. En el desmanchado se remueve el almidón, se seca y se destina para consumo animal o para la industria de adhesivos. El almidón resultante tiene dos destinos: ser secado para la venta como almidón nativo o fermentado para obtener almidón agrio.

De manera tradicional el proceso de fermentación se realiza en tanques construidos en ladrillo, recubierto con cemento en su parte externa y madera en su parte interna, con tamaños que dependen de la capacidad de la rallandería. En zonas con alta temperatura se recomienda enterrar los tanques de fermentación (Alarcon, 1998). En la actualidad los productores de almidón agrio de yuca están empleando tanques plásticos con tapa con el fin de mejorar la eficiencia en el proceso.

En la Figura 1-3 se presentan fotografías de dos rallanderías y dos tipos de fermentadores utilizados en Colombia para obtener almidón agrio de yuca.

Figura 1-3 Fotografías de dos rallanderías y tipos de fermentadores utilizados en la obtención de almidón agrio de yuca. Arriba, rallandería en el Departamento de Sucre y abajo rallandería en el Departamento de Cauca. Izquierda tanque de cemento y derecha tanque plástico enterrado.

El almidón de yuca húmedo se adiciona a los tanques de fermentación; luego se cubre con una capa de agua de 5 a 10 cm de alto proveniente del tanque de sedimentación. Los tanques de cemento se cubren con tela de polipropileno y los de plástico se tapan para evitar la evaporación de agua y mantener un ambiente anaerobio. La fermentación se realiza sin agitación con una duración de entre 30 y 70 días de acuerdo con el criterio del productor; el cual dependerá de la temperatura ambiente y las condiciones locativas de la rallandería (Vargas, 2010), además del pH. De acuerdo con algunas investigaciones la finalización de la fermentación se debe dar cuando la masa formada alcanza un valor de pH entre 3,5 y 4,0.

Después de la fermentación el almidón húmedo se fragmenta y se extiende al sol para que se seque por los rayos solares, este proceso toma entre uno y dos días dependiendo de las condiciones climáticas (Alarcon, 1998) hasta obtener una humedad entre 10 y 15%. Una vez seco el producto es estable se muele, se tamiza y se comercializa con el nombre de almidón agrio en Colombia y de *polvilho azedo* en Brasil (Boucher, 1995).

La fermentación y el secado al sol son etapas claves en la producción de almidón agrio de yuca debido a que el cambio estructural de interés para la funcionalidad en el poder de panificación, se da con la oxidación de los grupos carbonilos por la acción de los microorganismos presentes en la fermentación seguido de la reticulación de su estructura por reacciones radicalarias iniciadas con la energía del sol (Putri et al., 2012).

En la siguiente figura, adaptada de Alarcón (1998) se expone un diagrama del proceso de obtención del almidón de yuca realizado en una rallandería.

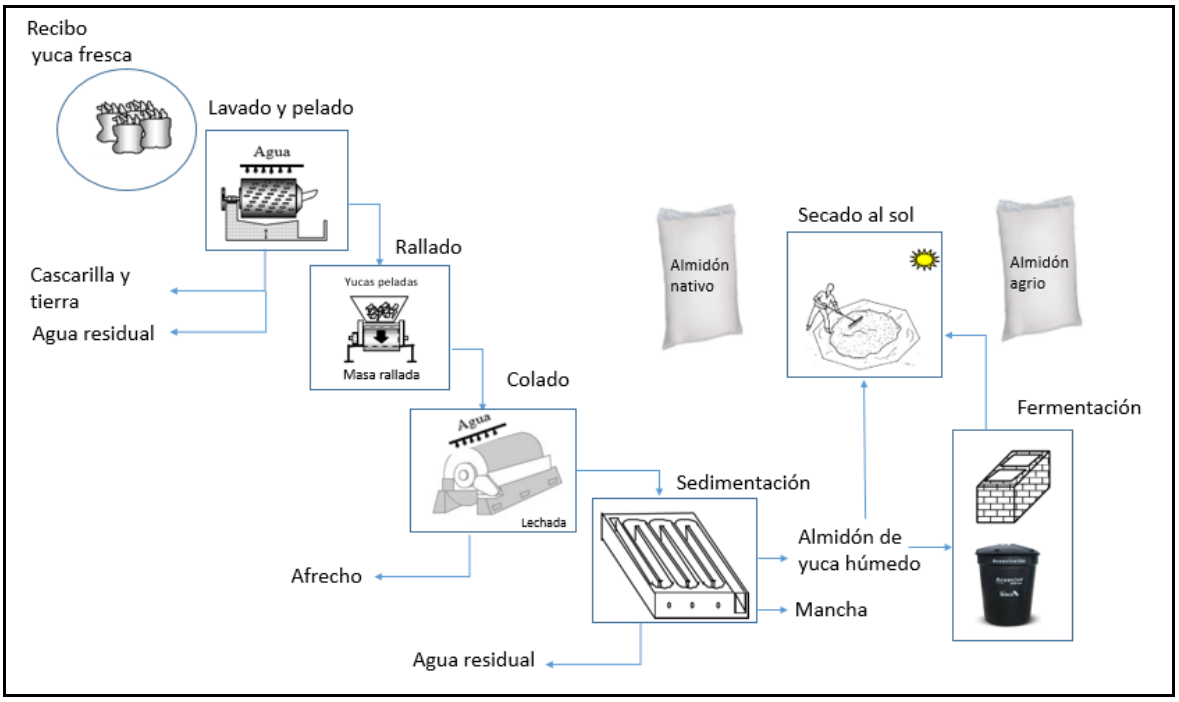

Figura 1-4 Diagrama del proceso de obtención del almidón agrio de yuca en el nivel de una rallandería.

En el proceso tradicional de fermentación del almidón de yuca que se realiza en una rallandería no se introducen microorganismos externos iniciadores dejando esta acción a los que existen de manera natural en las fases anteriores del proceso. A pesar que se ha

identificado diversidad en los microorganismos los predominantes son los acido lácticos, cada flora cumple funciones específicas en las etapas donde ocurre. Según Cereda (1975) en este proceso se presentan tres sucesiones microbianas: la primera consiste de grupos de coliformes y mesofilos aerobios; la segunda está conformada por microorganismos productores de ácidos, principalmente bacterias acido lácticas (BAL), exigentes, para su desarrollo requieren condiciones microaerobias o anaerobias, son los microorganismos dominantes en la microbiota natural de la fermentación y responden por la actividad amilolitica sobre los gránulos de almidón (Marcon *et al*., 2006). El metabolismo de esta flora ácido láctica hace que el almidón disminuya rápidamente el pH pasando de 7 a 3,5 en los primeros 5 días de fermentación, aumentando la concentración de los ácidos orgánicos, principalmente con grupos carboxilatos en su mayoría ácido láctico que influyen en las propiedades sensoriales de olor y sabor del producto final (Brabet *et al*., 1996). En la última fase predominan las levaduras saprofitas.

Son varios los factores que pueden variar la calidad del almidón producido después de la fermentación, uno de los más importante es el tipo de microrganismos que hidrolizan el almidón nativo ya que su desarrollo y metabolismo es dependiente de condiciones ambientales como temperatura, agitación, cantidad de oxígeno, presencia de nutrientes, diseño y tiempo de permanencia en el fermentador. (Chandrashekhar *et al*., 2010).

Algunos investigadores han evaluado el efecto de la adición de nutrientes sobre la calidad del almidón. Marcon *et al* (2006) disminuyeron el tiempo de fermentación con la adición de jarabe de glucosa, sin que se afectara la calidad del producto final, determinada por el poder de panificación, lo que hizo más eficiente la obtención de almidón agrio (Marcon *et al.,* 2007). Adegunwa *et al* (2011) evaluaron el efecto del tiempo de fermentación sobre las propiedades de la pasta de almidones de seis variedades de yuca y encontraron que a mayor tiempo de fermentación era menor la fuerza y la estabilidad de la pasta, características derivadas de sus propiedades viscoamilograficas determinadas en un analizador de viscosidad. Para dichos investigadores la viscosidad pico, la viscosidad final y el tiempo pico decrecen con el tiempo de fermentación.

Chiquiza *et al* (2016) aislaron los microorganismos de un proceso de fermentación de almidón yuca en una rallandería del Departamento de Sucre (Colombia) e identificaron mediante prueba bioquímica 29 tipos de levadura y 47 especies de bacterias de las

cuales 12 presentaron actividad amilolítica, establecieron que hubo variación en la carga microbiana asociada al diseño del tanque y al material de fabricación e indicaron que los cambios en las condiciones climáticas y la variación de los tanques no proporcionaron condiciones específicas que favorecieran o inhibieran el crecimiento de ciertos microorganismos de interés que permitan la obtención de un almidón agrio de yuca con calidad estándar.

Por otro lado, para Angeloni (2009) y Demiate (2000) la fase de secado al sol del almidón agrio es considerada crucial debido a que los rayos solares continúan las modificaciones de la estructura del almidón las cuales son esenciales para obtener un producto final con propiedades fisicoquímicas y funcionales que no se tenían en el almidón original (Marcon *et al*, 2007). Estos cambios alteran la reología del almidón incrementando la capacidad de expansión y su viscosidad (Maeda *et al*, 2001). El almidón agrio obtenido es un producto de bajo pH, alto factor ácido y baja viscosidad, características que son causadas por la disminución en el grado de polimerización que produce la hidrólisis durante la fermentación (Bertolini, 2001). Vatanasuchart *et al* (2005) evaluaron la incidencia de los rayos ultravioleta de diferentes intensidades sobre los cambios estructurales en el almidón. En su trabajo pudieron establecer que existió influencia de los rayos ultravioleta sobre el poder de panificación. Teniendo en cuenta que es necesario que el almidón sea oxidado previamente a la fermentación ácido láctica Demiate *et al* (2000) realizaron oxidaciones químicas en el almidón nativo y concluyeron que éstas no eran suficientes para obtener la funcionalidad del almidón en el horneo; era necesario el secado al sol ya que éste modifica la estructura molecular de la red de almidón fermentado ocasionando su despolimerización haciéndolo funcional para la industria panadera (Vatanasuchart *et al*, 2005).

La fermentación y el secado al sol cambian la reología del almidón nativo reduciendo la temperatura inicial de la pasta, la resistencia a la agitación y la tendencia a gelificar cuando es enfriado (Marcon *et al*, 2007). Estos cambios influyen en el poder de expansión del almidón agrio de yuca, el cual, dependiendo de su valor, se clasifica en diferentes grados a los cuales se asocia diferente precio en el mercado (Tischer, 2004).

El almidón agrio obtenido tiene características diferentes a la del almidón nativo. Entre estas cabe resaltar: mayor poder de hinchamiento, cambios en la viscosidad y la solubilidad, las cuales le confieran propiedades de expansión, suavidad y estructura alveolar características de los productos horneados. Por estas cualidades en Colombia este almidón se usa para la elaboración de alimentos como *pan de bono, pan de yuca, besitos, rosquillas* (Alvarado, 2013).

1.5.2 Caracterización del almidón agrio de yuca

De acuerdo con Wang (1994) las propiedades más importantes que se deben considerar para utilizar un almidón en la elaboración de alimentos son fisicoquímicas (gelatinización y retrogradación) y funcionales (solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles). Estas ofrecen información del comportamiento de la estabilidad del almidón durante el procesado y el almacenamiento.

La capacidad o poder de expansión es la principal característica de calidad funcional que diferencia el almidón agrio de yuca del almidón de yuca nativo, ya que hace crecer la masa durante el horneo sin necesidad de adicionar leudantes (Angeloni *et al*, 2009). En cuanto a proceso esta característica depende de la manera cómo se obtenga el almidón agrio. La metodología empleada para su medición también debe ser tenida en cuenta. Para evaluar el poder de expansión, generalmente expresado como el volumen específico (VE), se han empleado diferentes metodologías que incluyen cambios en los ingredientes de la receta e incluso diferencias en el procedimiento de elaboración de la masa. En la Tabla 1-3 se presenta información, elaborada a partir de la literatura, sobre algunos aspectos que acompañan las formulaciones de panificación para la evaluación del poder de expansión.

Tabla 1-3 *Formulaciones de panificación experimental para la evaluación de poder de expansión del almidón.*

Referencia	Temperatura (°C)	Ingredientes	Tiempo (min)	Agua (mL)	Volumen especifico (mL/g) ó (cm^3/g)
Alvarado (2013)	260	125 g amidón agrio 75 g queso 18,7g aceite de oliva	13	100	Protocolo CIAT (no publicado)

Angeloni, (2009)	200	50 g almidón agrio	25	40	Desplazamiento de semilla de colza Protocolo CERAT
Demiate (2000)	200	12 g almidón agrio	25	10	Con probeta volumen desplazado de agua
Maeda, (2001)	200	50 g almidón agrio	25	40	Desplazamiento de semilla de mijo
Tischer (2004)	262 ± 3	10 g almidón agrio	22	12	Método CIAT (1999)

Maeda *et al* (2001) compararon la variación en el poder de expansión de *polvilho azedo* usando una metodología de amasado manual y una instrumental con un Farinografo Brabender. Según estos autores con ambos métodos se obtienen diferentes resultados; sin embargo, el método instrumental es más complejo y presenta mayor variación en los valores de las mediciones, razones que explican entre otras por qué a nivel industrial se utiliza el método de amasado. Estos mismos autores establecieron la siguiente escala de capacidad de expansión en el horneo o poder de panificación: Tipo A valores superiores a 16 mL/g. Tipo B entre 12 mL/g y 16 mL/g. Tipo C inferiores a 12 mL/g. En Colombia existe una escala de grados de calidad para el almidón basada en el método CIAT. En ella se clasifica el almidón agrio en cuatro grupos: bajo, corriente, bueno y extra. El almidón extra debe tener valores de poder de expansión superiores a 12 mL/g y se usa en la preparación de *pan de yuca.* El bueno o grado 1 presenta valores entre 10 mL/g y 12 mL/g, su uso está dirigido a la elaboración de *pasabocas.* El corriente o grado 2 con valores de expansión entre 8 mL/g y 10 mL/g) se utiliza en la elaboración de *pandebonos* y *almojábanas*. Los almidones con grado 3 de expansión (entre 6 y 7 mL/g) o almidones bajos son para *buñuelo*.

En Colombia el uso del almidón agrio de yuca en la elaboración de pasabocas tiene como función darles volumen y sabor. Como el producto final tiene diferentes calidades para su venta requiere ser clasificado en categorías basadas en el poder de expansión

que alcancen en el horneo. Otras exigencias de calidad que estos productos deben cumplir se refieren a aspectos físicos como el tamaño y color, sensoriales como el olor y sabor, de composición química como la humedad, pH, acidez, contenido de almidón y de amilosa, algunas propiedades reológicas (viscosidad) y la calidad microbiológica.

En Colombia el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) ha aprobado algunas Normas Técnicas Colombianas relacionadas con la yuca. Está la NTC1255 “Yuca para consumo humano”, la NTC2716 “Frutas, legumbres y hortalizas. Yuca seca para consumo humano” y la NTC6066 “Productos de molinería. Almidón nativo de yuca”, destinado al procesamiento ulterior en la alimentación humana. También está la CODEX STAN 176-1989 (Gallego, 2015). Aunque entre productores generalmente la medición de la calidad del almidón agrio de yuca es empírica (Fernández *et al*, 2002) existen diversas fichas técnicas utilizadas en las transacciones comerciales de este producto tal como se especifica en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4 *Especificaciones de calidad de fichas técnicas de almidón agrio de yuca de diferentes productores.*

Parámetro	**Rango de calidad**
Color	Blanco
Olor y sabor	Característico
Almidón %	84 – 88 bs
Humedad %	12 – 14
Ph	3.5 – 4.5
Temperatura media de gelatinización °C	62-63
Amilosa %	21.5
Viscosidad máx (U.B)	482

Adaptado de (Mosquera, 2012)

Conclusiones de capítulo

El almidón es una molécula que ha sido estudiada desde hace mucho tiempo y se continúa investigando debido a la importancia que ha tomado no solo como alimento que suministra energía sino también como alimento que ofrece ventajas en la nutrición; lo que ha hecho que su calidad nutricional sea evaluada como su capacidad de dosificar la liberación de glucosa en la sangre. Por otro lado, la gran variabilidad natural de los almidones ha hecho que cada fuente tenga características particulares y necesite ser evaluada de manera independiente. Con esta revisión se evidenció que las características fisicoquímicas y nutricionales dependen del origen del almidón.

Las propiedades funcionales del almidón dependerán no solo de su estructura sino también de los tratamientos físicos, químicos o enzimáticos a los cuales este sea sometido. Generalmente durante el uso del almidón en alimentos este es procesado mediante tratamientos hidrotérmicos, los cuales modifican su estructura y cambian las temperaturas de cambio de fase, fenómenos que son dependientes de la cantidad de agua adicionada y de la temperatura suministrada.

Evaluar de forma integral el almidón incluyendo las características fisicoquímicas, funcionales y nutricionales permite sistematizar el conocimiento y evaluar su calidad dependiendo del uso para el cual este sea destinado. Actualmente existen muchos estudios que buscan correlacionar las propiedades fisicoquímicas y la estructura del almidón con su digestibilidad para ello utilizan métodos *in vitro* que permiten estudiar solo los factores intrínsecos del alimento que la afectan, creando escalas de digestibilidad más reproducibles.

Las etapas de fermentación y secado al sol son claves para la obtención de un almidón agrio de calidad funcional, las condiciones dadas a los microorganismos involucrados en la fermentación determinaran la calidad del producto final obtenido, la variación en las

condiciones climáticas, tipo de tanque de fermentación y tiempo de permanencia en él, afectan la obtención de un producto con calidad estándar.

Referencias

Abbas, K. A. (2010). Modified starches and their usages in selected food products: a review study. *Journal of Agricultural Science, 2(2),* 90-102.

Adegunwa, M. O., Sanni, L. O., & Maziya-Dixon, B. (2011). Effects of fermentation length and varieties on the pasting properties of sour cassava starch. African Journal of Biotechnology, 10(42), 8428-8433.

Alarcon, F. D. (1998). Almidon agrio de yuca en Colombia. Tomo1: Producción y recomendaciones. Cali: CIAT.

Alvarado, P. M. (2013). Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. *Carbohydrate polymers, 98(1),* 1137-1146.

Angeloni, M. K. (2009). Expansion Properties of Sour Cassava Starch (Polvilho Azedo): Variables Related to its Practical Application in Bakery. *Starch/Stärke*, *61(12),* 716-726.

Annison, G. T. (1994). Nutritional role of resistant starch: Chemical structure vs physiological function. *Annual Rev. Nutrition, 14(1)*, 297-320.

Barsby, T. L. (2001). *Starch: Advances in structure and function.* London: Royal Society of Chemistry.

Bertolini, C. (2010). *Starches characterization, properties, and applications.* New York: CRC press.

Bertolini, A. C. (2001). Photodegradation of cassava and corn starches. *Journal of agricultural and food chemistry, 49(2)*, 675-682.

Brabet, C., Chuzel, G., Dufour, D., Raimbault, M., & Giraud, J. (1996). Improving cassava sour starch quality in Colombia. D. Dufour, G. O'Brien, R. Best. Cassava Flour and

Starch: Progress in Research and Development, CIRAD-SAR/CIAT, CIAT, Cali, Colombia. Capítulo, 27, 241-246.

Breuninger, W. F. (2009). Tapioca/Cassava Starch Production and Use. In J. W. BeMiller, *Starch: Chemistry and Technology* (pp. 541-564). Oxford: Elsevier.

Boucher, F., & Muchnik, J. (1995). Agroindustria rural: recursos técnicos y alimentación (No. 1). Bib. Orton IICA/CATIE.

Cai, L. S. (2014). Preparation, structure, and digestibility of crystalline A- and B-type aggregates from debranched waxy starches. *Carbohydrate Polymers, 105,* 341-350.

Cereda, M. P. (1975). Microorganismos e ácidos orgânicos ocorrentes na fermentação de fécula de mandioca. Anais da academia brasileira de ciências Rio de Janeiro, 47, 361-362.

Chandrashekhar, H., & Rao, J. V. (2010). An Overview of Fermenter and the Design Considerations to Enhance Its Productivity. *Pharmacology on-line*, 261-301.

Chiquiza-Montaño, L. N., Montoya, O. I., Restrepo, C., & Orozco-Sánchez, F. (2016). Estudio de la Microbiota del Proceso de Producción de Almidón Agrio de Yuca. Información Tecnológica, 27(5), 3-14.

Chung H., H. R. (2008). In vitro starch digestibility, expected glycemic index, and thermal and pasting properties of flours from pea, lentil and chickpea cultivars. *Food Chemistry, 111(2)*, 316-321.

Colonna, P. B. (2010). Thermal transitions of starches. *Starches: Characterization, properties, and applications*, 71-102.

Demiate, I. D. (2000). Relationship between baking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy . *Carbohydrate Polymers, 42(2)*, 149-158.

Dhital, S. S. (2010). Relationship between granule size and in vitro digestibility of maize and potato starches. *Carbohydrate Polymers 82(2)*, 480-488.

Dona, A. P. (2010). Digestion of starch: In vivo and in vitro kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release. *carbohydrate polymers, 80(3)*, 599-617.

Douzals, J. M. (1996). Microscopic study of starch gelatinization under high hydrostatic pressure. *Journal Agriculture Food Chemistry, 44(6)*, 1403-1408.

Eliasson, A. (1985). Starch gelatinization in the presence of emulsifiers: A morphological study of wheat starch. *Starch/Staerke*, *37*(12), 411-415.

Eliasson, A. (2004). Starch in food. In A. C. Eliasson, *Starch in food: Structure, function and applications.* Boca Raton: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.

Eliasson, A. C. (1986). Viscoelastic behaviour during the getatinization of starch. I. Comparison of wheat, maize, potato and waxy-barley starches. *Journal of texture studies, 17(3),* 253-265.

Eliasson, A. G. (2006). Starch: physicochemical and functional aspects. In A. Eliasson, *Carbohydrates in food* (pp. 391-469). Boca Raton: Taylor & Francis.

Ellis, R. P., Cochrane, M. P., Dale, M. F. B., Duffus, C. M., Lynn, A., Morrison, I. M., ... & Tiller, S. A. (1998). Starch production and industrial use. *Journal of the Science of Food and Agriculture* *77*(3), 289 – 311.

Englyst, H. K. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Europe Journal Clinic. Nutritional, 46*, S33-S50.

Englyst, H., & Kingman, S. H. (1996). Measurement of resistant starch in vitro in vivo. *British Journal of nutrition, 75(5)*, 749-755.

Fernández, A. Z. (2002). *Desarrollo de un método sencillo para medir la calidad del almidón agrio de yuca: impacto del método sobre la agroindustria rural en el departamento del Cauca (Colombia).* Cauca.

FAO, (2005). Combined Compendium of Food Additive Specifications, FAO JECFA Monographs 1.

FAO/WHO, (1998). Carbohydrates in Human Nutrition: Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation, 14-18 April 1997, Rome. FAO Food and Nutrition Paper No. 66. Rome.

Ferng, L. . H., Liou, C. M., Yeh, R., & Chen, S. H. (2016). Physicochemical property and glycemic response of chiffon cakes with different rice flours. *Food Hydrocolloids, 53,* 172-179.

Gallego, C. G. (2015). *producción y usos de harina refinada de yuca.* Palmira Colombia: OEI/SENA/CLAYUCA/Fundación promotora del canal del dique .

Gernat, C., Radosta, S., Damaschun, G., & Schierbaum, F. (1990). Supramolecular structure of legume starches revealed by X-ray scattering. *Starch-Stärke, 42(5),* 175-178.

Goñi, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research, 17(3),* 427-437.

Han, J. A., & BeMiller, J. N. (2007). Preparation and physical characteristics of slowly digesting modified food starches. *Carbohydrate polymers, 67(3),* 366-374.

Haralampu, S. (2000). Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3. . *Carbohydrate Polymers, 41(3)*, 285.292.

Hódsági, M., Gergely, S., Gelencsér, T., & Salgó, A. (2012). Investigations of Native and Resistant Starches and Their Mixtures Using Near-Infrared Spectroscopy. *Food and bioprocess technology, 5(1),* 401-407.

Homayouni, A., Amini, A., Keshtiban, A. K., Mortazavian, A. M., Esazadeh, K., & Pourmoradian, S. (2014). Resistant starch in food industry: A changing outlook for consumer and producer . *Starch/Stärke, 66(1-2)*, 102-114.

Huang, R. M., Chang, W. H., Chang, Y. H., & Lii, C. Y. (1994). Phase transitions of rice starch and flour gels. *Cereal Chemistry, 71(2)*, 202-206.

Imberty, A., & Perez, S. (1988). A revisit to three dimensional structure of B-type starch. *Biopolymers, 27(8),* 1205-1221.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 1255. Yuca para consumo. 1979.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 2716. Fruta, legumbres y hortalizas. Yuca seca para consumo humano. 1990.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 6066. Almidón nativo de yuca. 2014.

Internet, F. d. (2017). Figura. In *http://www.starch.dk/isi/stat/img/RawMaterialPieNative.gif Consultada Dic/2016.*

Internet, F. d. (2017). *http://www.trademap.org Consultada Jul/2017.*

Jenkins D. J, Kendall, C. W., Augustin, L. S., Franceschi, S., Hamidi, M., Marchie, A., ... & Axelsen, M. (2002). Glycemic index: overview of implications in health and disease. *The American journal of clinical nutrition, 76(1),* 266S-273S.

Kasprzak, M. M., Lærke, H. N., Hofmann Larsen, F., Bach Knudsen, K. E., Pedersen, S., & Jørgensen, A. S. (2012). Effect of Enzymatic Treatment of Different Starch

Sources on the in Vitro Rate and Extent of Starch Digestion. *International journal of molecular sciences, 13(1),* 929-942.

Kaur, L., Singh, J., McCarthy, O. J., & Singh, H. (2007). Physico-chemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *Journal of Food Engineering, 82(3),* 383-394.

Kaur, M., & Sandhu, K. S. (2013). Starch: Its Functional, In Vitro Digestibility, Modification, and Applications. In *Biotechnology: Prospects and Applications* (pp. 39-52). India: Springer India.

Ma, M., Wang, Y., Wang, M., Jane, J. L., & Du, S. K. (2017). Physicochemical properties and in vitro digestibility of legume starches. *Food Hydrocolloids,* 63, 249-255.

Maeda, K. et al. (2001). Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 139-143.

Marcon, M. J. A., Vieira, M. A., Santos, K., De Simas, K. N., Dias De Mello Castanho Amboni, R., & Amante, E. R. (2006). The effect of fermentation on cassava starch microstructure. *Journal of food process engineering*, 29(4), 362-372.

Marcon, M. J. A., Vieira, G. C. N., Simas, K. N. D., Santos, K., Vieira, M. A., Amboni, R. D. D. M. C., & Amante, E. R. (2007). Effect of the improved fermentation on physicochemical properties and sensorial acceptability of sour cassava starch. *Brazilian Archives of Biology and technology*, *50(6),* 1073-1081.

Miao, M., Xiong, S., Jiang, B., Jiang, H., Cui, S. W., & Zhang, T. (2014). Improved the slow digestion property of maize starch using partially β-amylolysis. *Food Chemistry*, 152, 128–132.

Miyazawa, T., Ohtsu, S., Nakagawa, Y., & Funazukuri, T. (2006). Solvothermal treatment of starch for the production of glucose and maltooligosaccharides. *Journal of materials science, 41(5)*, 1489-1494 .

Nayak, B., Berrios, J. D. J., & Tang, J. (2014). Impact of food processing on the glycemic index (GI) of potato products. *Food research international,* 56, 35-46.

Mosquera, R. M. (2012). *Mejoramiento del proceso tradicional para la obtención de almidón agrio de Yuca en el sector de Mondomo–Cauca.* Cauca.

Gibson, N., Schönfeldt, H. C., & Pretorius, B. (2011). Development of a rapid assessment method for the prediction of the glycemic index. *Journal of Food Composition and Analysis, 24(4)*, 750-754.

Olazábal, B. M. (1980). *Una metodología para el sondeo de mercados agrícolas.* IICA Bogotá: IICA Bogotá.

Parada, J., & Rozowski, J. (2008). Relación entre la respuesta glicémica del almidón y su estado microestructural. *Revista chilena de nutrición, 35(2),* 84-92.

Putri, W. D. R., Marseno, D. W., & Cahyanto, M. N. (2012). Role of lactic acid bacteria on structural and physicochemical properties of sour cassava starch. APCBEE Procedia, 2, 104-109.

Sánchez, T., & Aristizábal, J. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO, 163.

Sandoval, A. F. (2013). Physicochemical characterization of two cassava (Manihot esculenta Crantz) starches and flours. *Scientia Agroalimentaria*, 1, 19-25.

Sena, Aquino, A., Pereira, J. M., Watanabe, L. B., & Amante, E. R. (2013). Standardisation of the sour cassava starch reduces the processing time by fermentation water monitoring. *International Journal of Food Science & Technology, 48(9),* 1892-1898.

Slade, A. J., McGuire, C., Loeffler, D., Mullenberg, J., Skinner, W., Fazio, G., ... & Knauf, V. C. (2012). Development of high amylose wheat through TILLING. *BMC plant biology, 12(1),* 69.

Stacey, J. B. (2011). Glycemic index for the management of chronic disease: Why certain foods like raisin may be beneficial. *The Open Nutrition Journal*, 5, 7-12.

Rosales J.M. y Páucar R., (1996). Uso de la cascara de yuca en raciones para cerdos en Crecimiento. *folia amazonica 8(2),* 105-118.

Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science, 39(2),* 151-165.

Tischer, I. M. (2004). Influencia de la localización del almidón nativo de yuca en el canal de sedimentación sobre la calidad del almidón agrio. *Ingeniería y Competitividad*, 26-34.

Topping, D. L., & Clifton, P. M. (2001). Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides. *Physiological reviews, 81(3),* 1031-1064.

Van Der Maarel, M. J., Van Der Veen, B., Uitdehaag, J. C., Leemhuis, H., & Dijkhuizen, L. (2002). Properties and applications of starch-converting enzymes of the α-amylase family. *Journal of biotechnology, 94(2),* 137-155.

Van Hung, P., Huong, N. T. M., Phi, N. T. L., & Tien, N. N. T. (2017). Physicochemical characteristics and in vitro digestibility of potato and cassava starches under organic acid and heat-moisture treatments. *International journal of biological macromolecules,* 95, 299-305.

Vargas, P. (2010) Obtención de almidón fermentado a partir de yuca (Manihot esculenta crantz) variedad valencia, factibilidad de uso en productos de panadería*. Revista Tecnología en Marcha, 23(3),* 15-23.

Vatanasuchart, N., Naivikul, O., Charoenrein, S., & Sriroth, K. (2005). Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. *Carbohydrate polymers, 61(1),* 80-87.

Wang, T. L., Bogracheva, T. Y., & Hedley, C. L. (1998). Starch: as simple as A, B, C?. *Journal of Experimental Botany, 49(320),* 481-502.

Wang, L. Z., & White, P. J. (1994). Structure and properties of amylose, amylopectin, and intermediate materials of oat starches. *Cereal Chemistry, 71(3),* 263-268.

Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydrate polymers,* 122, 456-480.

Capítulo II

Evaluación y comparación de las características fisicoquímicas y funcionales del almidón agrio de yuca obtenido en dos fermentadores diferentes

Resumen

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación del efecto del empleo de dos tanques fermentadores sobre algunas características fisicoquímicas y funcionales del almidón agrio de yuca.

Se comparó la utilización de tanques plásticos y de cemento como fermentadores sobre la calidad del almidón agrio de yuca en una rallandería del departamento del Cauca, seleccionada por su nivel tecnológico y conservación del proceso tradicional típico, que además dispone de esos dos tipos de tanques de fermentación y no adiciona otros ingredientes, ni inóculos externos o ácidos.

Se tomaron muestras de cuatro lotes de la producción comercial por cada tipo de fermentador o tanque de fermentación denominados en el estudio como lotes. También se realizaron dos muestreos del almidón de yuca sin fermentar al cual se denominó la muestra de almidón nativo o no modificado el cuál fue considerado como tratamiento

control. En cada muestreo se evaluaron parámetros fisicoquímicos (humedad y otros materiales volátiles, pH, acidez, amilosa) y funcionales como el índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad (ISA), poder hinchamiento y capacidad de expansión. Se utilizaron técnicas instrumentales para su caracterización como la espectroscopía infrarroja (ATR-FTIR) para determinar la presencia de grupos funcionales y evaluar cambios en la estructura de las muestras y la microscopia electrónica de barrido (SEM) para detectar los cambios morfológicos en la superficie.

El experimento se condujo en un diseño de bloques incompleto con tres tratamientos (fermentador plástico, de cemento y muestra control) y el número del muestreo (lote) como factor de bloqueo. La información generada en el estudio fue analizada estadísticamente mediante análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM identificando como fuentes de variación el tipo de fermentador (tratamiento) y el número de muestreo (lote). Se efectuó comparación de medias entre los tratamientos usando la prueba de MDS de Fischer. Además, se realizó un análisis de correlación lineal simple utilizando la correlación de Pearson. El ordenamiento estructural fue determinado por ATR-FTIR y se utilizó análisis SEM para observar la morfología superficial, los resultados de estas dos técnicas no fueron analizados estadísticamente.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos mostraron coeficientes de variación (CV) muy dispersos, hecho que podría explicar por qué no hubo diferencia entre los dos procesos de fermentación, el cual a su vez se podría articular a las condiciones poco estandarizadas que tiene la rallandería para la selección de la materia prima y el mismo proceso de producción.

De las variables objeto de estudio el análisis de varianza mostró que el modelo propuesto no fue significativo para el IAA, ISA y el poder de hinchamiento, variables que presentaron los CV más elevados.

El análisis de varianza señaló que excepto para la humedad y otros materiales volátiles hubo efecto significativo del tratamiento (tipo de fermentador). Solo en la capacidad de expansión además del efecto del tratamiento el lote introdujo diferencias en sus valores.

Los resultados indicaron que la muestra control presentó menor acidez y capacidad de expansión que las muestras procedentes de los fermentadores. En igual dirección la muestra control tuvo mayor pH que las del almidón agrio de yuca. El contenido de amilosa en la muestra control fue semejante al del almidón agrio del fermentador plástico, pero menor que las procedentes del fermentador de cemento. La comparación del almidón agrio de yuca procedente de los dos fermentadores permite concluir que no hubo diferencia para la acidez, el pH y la capacidad de expansión.

El análisis de los resultados de las correlaciones permitió establecer diferentes tipos de asociaciones entre las variables seleccionadas. A modo de resumen se pudo establecer que el contenido de amilosa del almidón de yuca, tanto nativo como modificado, estuvo relacionado de manera positiva con el ISA y de forma negativa con el pH, tuvo una baja asociación con la capacidad de expansión y en nada se relacionó con el poder de hinchamiento.

Tanto la técnica ATR-FTIR como el SEM proporcionaron información adecuada sobre la caracterización del ordenamiento estructural del almidón, sus formas y los tamaños de partícula tanto para el almidón nativo como el agrio de yuca.

Abstract

In this work, the results of the evaluation of the effect of using of two types of fermenters on some physicochemical and functional characteristics of the cassava starch are presented. Samples of cassava sour starch were obtained from a *Rallandería* located in Cauca Colombia, selected for its technological level and conservation of the typical traditional process, without the addition of other ingredients, mineral acids or acids.

The use of plastic and cement tanks as fermenters on the integral quality of cassava sour starch was compared. Four batches of commercial production were sampled from each fermenter and two from native starch (treatment control). Physicochemical parameters (moisture and other volatile materials, pH, acidity, amylose) and functional parameters such as water absorption index (IAA), solubility index (ISA), swelling capacity and expansion capacity were evaluated. In addition, some instrumental techniques were also used for samples characterization such as infrared spectroscopy (ATR-FTIR) to determine the presence of organic functional groups and structural changes, and scanning electron microscopy (SEM) to detect surface morphological changes.

The experiments were conducted using an incomplete block design with three treatments (plastic fermenter, cement fermenter and control sample) and the number of sampling (Batch) as variation sources. The information generated in the study was statistically analyzed by analysis of variance using the GLM procedure. Means were compared between treatments using the Fischer MDS test. In addition, a linear and simple correlation analysis was performed using the Pearson methodology. The structural ordering determined by ATR-FTIR and surface morphology using SEM analysis were not statistically analyzed.

The results of the physicochemical parameters showed a variable behavior in their variation coefficients (CV), a fact that could explain why there was no difference between the two fermentation processes, which in turn could articulate the little standardized

conditions that the selected *Rallandería* might have for the raw material and production process itself.

From the variables studied, the analysis of variance showed that the proposed model was not significant for the IAA, ISA and the swelling power, variables that presented the highest CV. Also, the analysis of variance indicated that except for moisture and other volatile materials there was a significant treatment (fermenter type) effect on the expansion capacity only. However, besides the treatment effect, the batches introduced some differences in its expansion capacity values.

The results indicated that the control sample presented lower acidity and expansion capacity than the samples from the fermenters. In the same way, the control sample had a higher pH value than those of the cassava sour starch. The amylose content in the control sample was similar to that of cassava sour starch from plastic fermenter, but lower than that from cement fermenter. The comparison of the cassava starch from the two fermenters allows concluding that there was no difference for acidity, pH and expansion capacity.

The analysis of the correlations results allowed establishing different types of associations among the selected variables. As a summary, it was possible to establish that the amylose content of native and modified cassava starch was positively related to ISA and negatively with the pH. It was also found a low association with the expansion capacity and there was no any association with the swelling power. Both the ATR-FTIR and SEM techniques provided adequate information on the characterization of starch structural order, their forms and particle sizes in both native and cassava starch.

2.1 Introducción

El almidón agrio de yuca es el ingrediente principal de algunos snacks típicos de Colombia como las rosquillas, los buñuelos, las almojábanas, pan de yucas, su función es darles volumen y sabor característico a estos productos de panadería (Alvarado *et al*, 2013). El departamento del Cauca es el mayor productor de almidón agrio de yuca a nivel nacional, con una producción que cubre el 80% del consumo de este (Alarcon *et al*, 1998).

Tradicionalmente es obtenido de manera artesanal en rallanderías de diversos niveles tecnológicos clasificadas de acuerdo con el tipo de maquinaria utilizada en su procesamiento. Nivel bajo, para lugares en donde la extracción del almidón se hace de forma manual, nivel medio, aquellos que utilizan alguna maquinaria para la extracción, pero no tienen canales de sedimentación y no aprovecha la pendiente del terreno para hacer más fluido el proceso, las rallanderías de nivel alto tiene maquinaria en todas sus etapas, utiliza canales de sedimentación aprovecha la gravedad y tiene algún tipo de tratamiento de agua (Gottret *et al*., 2003).

Las etapas unitarias generales de la producción de almidón agrio de yuca en las rallanderías de todos los niveles son generalmente las mismas; consisten en la extracción por vía húmeda del almidón nativo de las raíces de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) mediante lavado, pelado y posterior rallado de estas, una vez obtenida la masa es filtrada y el sobrenadante es sedimentado para obtener el almidón nativo.

Para la obtención del almidón agrio de yuca, el almidón nativo se transfiere a tanques de fermentación que en las rallanderías actuales varían en sus dimensiones y materiales de fabricación (Chiquiza *et al,* 2016). Para mantener el ambiente anaerobio generalmente se cubren con una capa de agua en exceso de 5 a 10 cm por encima de la cama de almidón (Demiate *et al*, 2000). El periodo de permanencia del almidón en el tanque de fermentación dura entre 30 a 70 días (Marcon *et al*, 2007). Una vez terminada la fermentación determinada por la disminución del pH, se lleva a patios de secado donde

se extiende el almidón fermentado en capas de 1 a 2 kg/m^2 sobre un plástico negro y por la acción directa de los rayos del sol durante aproximadamente 6 horas se le reduce la humedad y se obtiene un producto final comercializable (Ospina, 2002).

En el proceso de fermentación ocurren cambios estructurales en el almidón nativo debido a la acción de enzimas amiloliticas y ácidos orgánicos producidos por microorganismos endógenos de la yuca en su ambiente natural. Chiquiza *et al* (2016) evaluaron la población microbiana en la etapa de fermentación de una rallandería que utiliza diferentes tipos de tanques de fermentación, plástico cubico blanco, plástico cilíndrico negro con capacidad de 1000 L y 2000 L y tanque de cemento y encontraron que las poblaciones microbianas difieren de acuerdo con el tipo de tanque utilizado en la fermentación.

La calidad del almidón agrio puede variar incluso en el mismo productor y con yucas del mismo lote debido a la falta de control en sus etapas. Su proceso de obtención se realiza bajo condiciones poco controladas, ya que desde el inicio se introducen variaciones; las yucas recibidas son de diferente origen y variedad, la carga microbiana cambia porque depende de estas y del tipo de agua utilizada en la extracción, la utilización de diferentes tipos de tanques de fermentación también ocasionan que la población microbiana sea diferente en cada uno de ellos, sumándole las variaciones a causa de la falta de control en la temperatura y tiempo de permanencia en el fermentador, factores que dependerán del clima y de criterios empíricos de finalización, por último el tiempo de secado al sol depende de las condiciones ambientales.

Tischer *et al* (2004) evaluaron uno de los posibles factores de variación de la calidad del almidón; el tramo del canal de sedimentación en el cual se sedimento el almidón nativo. y concluyeron que la calidad funcional del almidón no depende de la parte del canal en donde este se depositó.

Como las poblaciones microbianas cambian de acuerdo con el tipo de fermentador usado en la producción de almidón agrio de yuca, lo que supone la obtención de un producto con una calidad menos consistente. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del uso de dos tanques de fermentación diferentes, previamente instalados y en operación

en una rallandería del Cauca sobre algunas características de calidad fisicoquímicas y funcionales del almidón agrio de yuca.

2.2 Metodología

La selección de la rallandería para la realización de este estudio constó de tres etapas. La primera fue una exploración del mercado del almidón agrio de yuca con el fin de escoger tres marcas comerciales (Y, D y J) referenciadas por su posicionamiento en el mercado. Para abordar esta exploración se partió de la información suministrada por una firma comercial con más de 30 años de experiencia en la distribución de insumos para panadería, repostería y bizcochería (DIMAPAN S.A.S. http://www.distribuidoradismapan.com). De cada marca se tomaron tres muestras de lotes diferentes de 1 kg y de cada muestra se hicieron tres réplicas. En la segunda etapa se realizó la evaluación preliminar y exploratoria de algunas variables fisicoquímicas como la humedad, pH, acidez y perfil de hinchamiento de las tres marcas comerciales con el fin de seleccionar aquel proveedor con el que se desarrollaría la tercera etapa. La última etapa consistió en la selección de proveedor basada en el nivel tecnológico y la estabilidad en el abastecimiento de almidón agrio de yuca que tuviese la rallandería.

La rallandería seleccionada está ubicada en la vía Pescador-Siberia del Municipio de Caldono en el Departamento del Cauca. En ella fue posible disponer de dos tipos de fermentadores o tanques de fermentación estáticos (tratamientos) de uso común en la operación diaria. Uno de ellos, denominado en el estudio fermentador plástico, estuvo enterrado en el suelo en un patio al aire libre, construido en polietileno negro con capacidad de 1000 L, de estructura semicónica, con una altura de 1,48 m y cobertura del mismo material. El otro tipo de fermentador, denominado de cemento, es un tanque de ladrillo recubierto con cemento, de geometría cúbica, de 1,2 m de profundidad, con capacidad de 1000 L, ubicado después de los canales de sedimentación, a la sombra de un techo de dos metros de altura. Durante el proceso de fermentación ambos tienen una capa de agua de 25 cm que cubre el almidón de yuca generando la condición de anaerobiosis. El tiempo de fermentación tomó entre 50 y 60 días a temperatura ambiental promedio de 22°C.

De cada tratamiento se realizaron cuatro muestreos (lotes) de almidón agrio de yuca. Como control se utilizaron muestras tomadas en dos momentos del almidón de yuca que no fue sometido al proceso de fermentación (almidón nativo). De cada muestreo se tomaron nueve submuestras (repeticiones), cada una de las cuales estaba compuesta por la suma de porciones de 100 g tomadas en cinco puntos del material seco a granel.

Las variables físicoquímicas evaluadas fueron:

La humedad y otras Materias volátiles se determinó por el método termo gravimétrico a 103°C ± 2°C.

El pH se midió en la fracción soluble de una suspensión al 10% (w/w) almidón/agua destilada después de agitar 20 min y decantar por 20 min, a temperatura ambiente utilizando el método potenciómetrico.

La acidez se determinó en el líquido sobrenadante de la suspensión anterior por titulación con NaOH 0,01N, usando fenoftaleina como indicador. La cantidad de ácido presente en la muestra se expresó en términos de porcentaje de ácido láctico.

El almidón total fue determinado por el método polarimétrico (Ewers).

Estas determinaciones se realizaron en el laboratorio de Análisis Químico y Bromatológico de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

En el laboratorio de Control y Calidad de Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín se determinó el contenido de amilosa en el almidón. Para tal efecto se siguió el micro método de McGrance (1998). Este se basa en la medida colorimétrica a 600 nm del complejo formado entre el yodo con amilosa y la amilopectina, usando dimetil sulfoxido (DMSO) como agente dispersante del almidón.

El procedimiento consistió en la siguiente secuencia. Se pesaron 20 mg de la muestra en diferentes porcentajes de fracción másica de amilosa (%FMA), pesados siguiendo la Tabla 2-1. Se adicionaron 0,4 mL de DMSO, se agitaron por 1min en vortex, se sometió a calentamiento a 85°C en baño maría por 10 min, luego se adicionó con agitación constante 0,4 mL de agua caliente, se continuó el calentamiento a 85°C por 20 min, se llevó a balón volumétrico de 50 mL y se aforó, se tomó 1 ml de esta solución en un tubo

de ensayo, luego se agregó 3 mL de agua destilada y 1 mL de solución de I_2/KI, y se leyó la absorbancia a 600 nm en la curva de calibración de la mezcla de diferentes fracciones másicas de estándar amilosa de papa (SIGMA® A-0512-5G) y amilopectina de papa (SIGMA® A-8515-25G). Para la determinación de la amilosa se estableció una curva de calibración por triplicado. En la Figura 2-1 se registra la curva de calibración utilizada.

Tabla 2-1 *Soluciones estándar de la mezcla amilosa amilopectina utilizadas en la curva de calibración para la determinación de la amilosa en el almidón de yuca.*

FMA (%)	Amilosa (mg)	Amilopectina (mg)
0	0	20
10	2	18
20	4	16
40	8	12
50	10	10
60	12	8
70	14	6
80	16	4

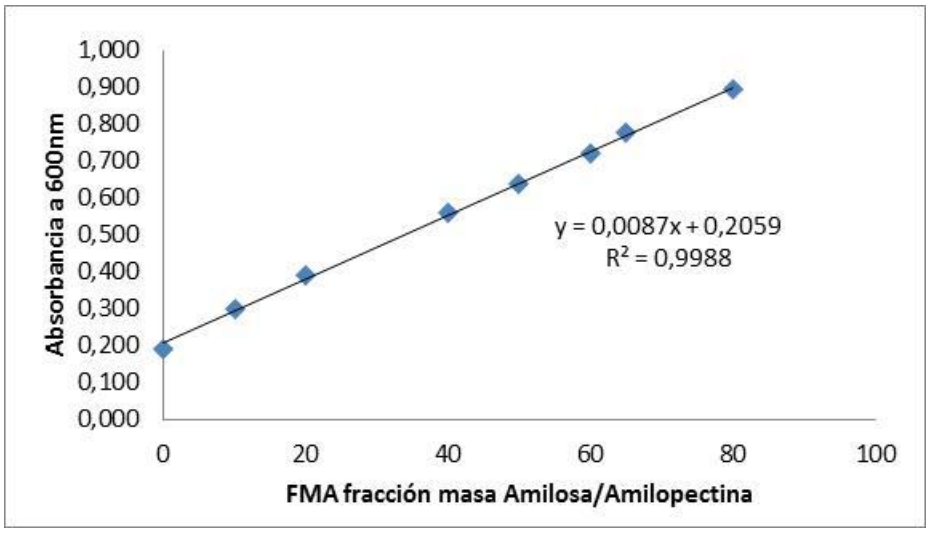

Figura 2-1 Curva de calibración utilizada para la determinación de amilosa y amilopectina en el almidón de yuca

La presencia de grupos funcionales de las muestras de almidón nativo y agrio de yuca se determinaron utilizando un espectrómetro FTIR Nicolet 6700 acoplado a un accesorio ATR y un detector MCT/A enfriado a -77^{0}K. Cada espectro fue el resultado de la acumulación de 300 *scans*, cuyo valor provee la mejor relación señal/ruido. El análisis espectral se llevó a cabo en el intervalo de onda entre 4000-400 cm^{-1} a una resolución de 4 cm^{-1}. Para estudiar a fondo el efecto de la hidrolisis enzimática en el ordenamiento de estructural del almidón agrio de yuca de este estudio, los espectros fueron corregidos en línea base entre 800 y 1200 cm^{-1}. Posteriormente, los espectros fueron deconvolucionados usando varias curvas de Gauss. La morfología y los cambios superficiales causados por las enzimas sobre los gránulos de almidón de yuca fueron observados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), la cual proporciona información del tamaño promedio de los gránulos. Los especímenes de almidón fueron depositados sobre una cinta adhesiva de grafito la cual se fijó previamente en un soporte de aluminio. Posteriormente las muestras se recubrieron con una nano-película de cadmio-oro y las imágenes fueron obtenidas usando un microscopio JEOL-JSM-5410 operado con un voltaje aplicado de 15 kV. Las fotografías se tomaron por triplicado a los siguientes grados de magnificación 2000x, 3000x y 5000x. Estas pruebas instrumentales se realizaron en el laboratorio QUIREMA de la Universidad de Antioquia.

La funcionalidad del almidón de yuca se determinó mediante diferentes variables, una de ellas es la capacidad de expansión. En el laboratorio de Farinología de Universidad Nacional de Colombia sede Medellín utilizando una prueba de panificación se evaluó por triplicado la capacidad de expansión del almidón de acuerdo con la metodología usada por Demiate (2000) con la introducción de una modificación basada en la adición de grasa para lograr la homogeneidad de las masas luego de ser horneadas.

Cuando se inició la determinación de la capacidad de expansión se evidenció que las masas que fueron horneadas salían huecas debido a que cuando aumenta la temperatura el vapor de agua busca salida y rompe la red formada en el almidón, lo cual dificultaba medir su volumen. Para evitar esta deformación se adicionó grasa a la mezcla que forma la masa ya que ésta crea una estructura de red más fuerte y no deja que ocurra el rompimiento durante la expansión en el horneo (Brooker *et al*., 1996).

Una vez atendida esta modificación el procedimiento consistió en formar una masa de 70g elaborada con aproximadamente 36 g de almidón agrio de yuca, 4 g de margarina y 30 mL de agua, mezclándola hasta lograr homogeneidad. De esta masa se tomaron tres porciones de 20 g que fueron horneados a 205°C por 25 min. Luego se determinó el volumen de la masa horneada usando el método de desplazamiento con semilla de mijo (AACC-10-05, 2000). Para optimizar la proporción adecuada de grasa adicionada se hicieron ensayos de inclusión en las proporciones 3, 5, 6, 8 y 10 %m/m, en base almidón, estableciéndose que 8%m/m era el nivel adecuado. Así mismo se estandarizó la temperatura del horno en la parte superior a 210°C y la inferior a 205°C. Los resultados fueron expresados como volumen especifico en (mL/g).

El índice de absorción de agua (IAA), el índice de solubilidad (ISA) y el poder hinchamiento fueron otras variables funcionales evaluadas. Ellas se determinaron por triplicado siguiendo el método de Anderson (1969). Estas pruebas se basan en la determinación gravimétrica de la cantidad de material disuelto. Para su realización se pesaron aproximadamente 1,25 g de almidón agrio en un tubo de centrífuga previamente tarado, se adicionaron 30 mL de agua destilada, precalentada a 60 °C. La muestra se colocó en un baño de agua a 60 °C durante 30 min, agitando la suspensión cada 5 minutos. La solución se enfrió en baño de hielo hasta temperatura ambiente, se centrifugó a 4900 rpm durante 15 min. Se extrajo el sobrenadante por succión y se midió su volumen en una probeta. El gel resultante se pesó y usó para calcular el IAA. Para la determinación del ISA se tomó una alícuota de 10 mL del sobrenadante y se adicionó en un vaso de precipitado previamente pesado, se secó en estufa a 105°C durante 24 h y se registró el peso del vaso con los sólidos solubles. Los cálculos se realizaron de acuerdo con las siguientes ecuaciones

$$IAA = \frac{(Peso\ gel\ más\ tubo - peso\ tubo)\ (g) W1}{Peso\ muestra\ (g) W0} \text{ . Ec 1}$$

$$ISA = \frac{(Peso\ solidos\ soluble\ más\ beacker - peso\ beacker)\ (g) W2 \times V \times 10}{Peso\ muestra\ (g) W0} \text{ . Ec 2}$$

$$Poder\ de\ hinchamiento = \frac{Peso\ gel\ (g) W1}{Peso\ muestra (g) W0 - Peso\ soluble\ (g) W2} \text{ . Ec 3}$$

La información obtenida de las variables de respuesta se analizó mediante un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA). Se utilizó un diseño de bloques incompleto, utilizando como tratamiento el tipo de fermentador y los muestreos (lote) como factor de bloqueo. No obstante que existe evidencia de la existencia de numerosos factores que afectan la calidad del almidón agrio de yuca, en el estudio no era posible incorporar al menos los más identificados. En virtud de lo anterior, el único efecto de bloque que se pudo establecer en el modelo fue el del lote; en él seguramente quedaron consignados al menos los efectos de variedad de la yuca, la edad y el proceso de cosecha por parte del proveedor, la variación en el tiempo de fermentación. Los datos fueron analizados mediante el procedimiento GLM. La comparación de medias entre los tratamientos se realizó usando el método MDS de Fischer. Se hizo además un análisis de correlación de Pearson. Los análisis se realizaron en el programa SAS versión 9.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Selección del proveedor de almidón agrio de yuca

En la Tabla 2-2 se registra la identificación y el origen de las marcas comerciales de almidón agrio de yuca consideradas en la primera fase del estudio.

Tabla 2-2 *Identificación y origen de tres marcas comerciales de almidón agrio de yuca*

Código de la muestra	Origen	Marca comercial
D	Sucre	Almidón de yuca agrio
J	Cauca	Sin nombre comercial
Y	Cauca	Todoyuca

En la Figura 2-2 se presentan los valores para las variables humedad y otros materiales volatiles, pH y acidez para las muestras de almidón agrio de las tres marcas comerciales identificadas. En esta fase del estudio no se realizaron análisis estadísticos porque el tamaño de la muestra no era suficiente; además, como se trataba de tres proveedores con condiciones operativas totalmente diferentes no era posible intentar una

comparación. En consecuencia, solo se presentan los valores de las tres variables con un fin descriptivo.

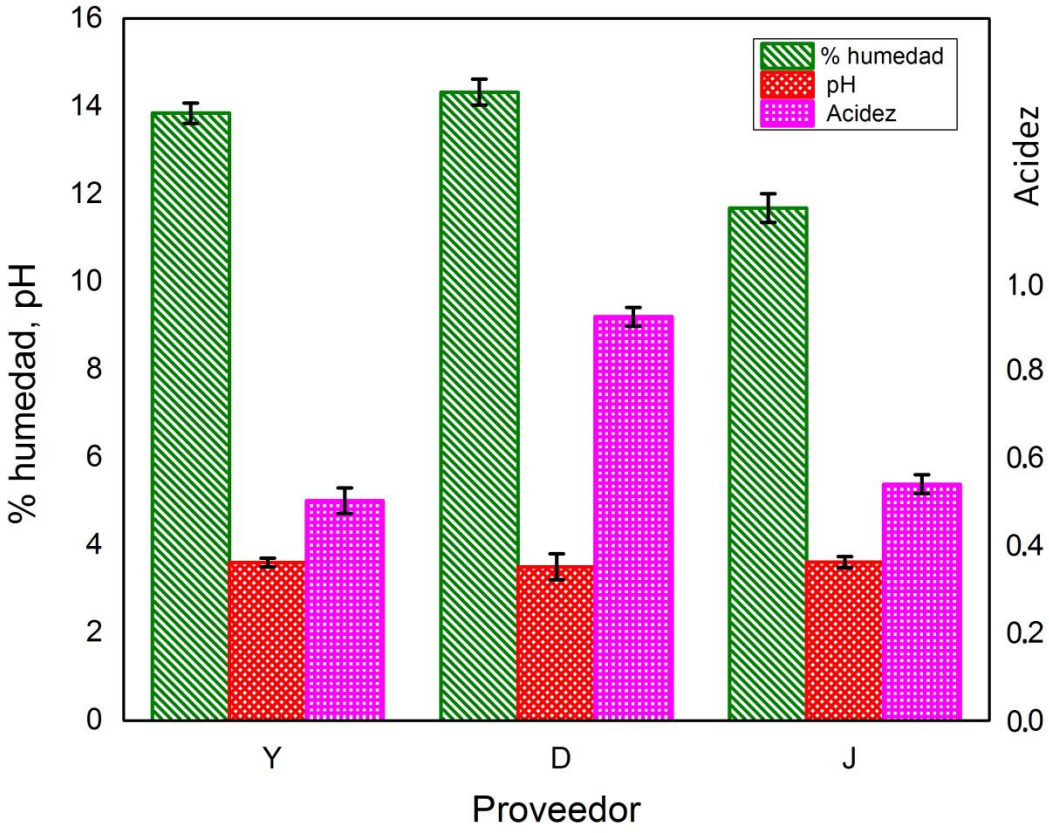

Figura 2-2. Valores de humedad, pH y acidez para las muestras de almidón agrio de yuca de tres marcas comerciales.

De acuerdo con los valores registrados en la figura anterior se puede observar que la humedad y materiales volátiles de los tres proveedores se encuentran dentro de los parámetros incorporados en la Tabla 1-4, los cuales se consideran aceptados en las fichas técnicas utilizadas en las transacciones comerciales. No obstante, estos valores estuvieron más o menos dos unidades porcentuales por encima de lo establecido por la Norma Técnica Colombiana 2716 (1990) para yuca seca para consumo humano y próximo al 13,5% como valor máximo aceptado por la Norma Técnica Colombiana 6066 (2014) para el almidón nativo de yuca destinado al procesamiento ulterior en la alimentación humana. Se supondría, que con los valores de humedad que presentaron

las muestras no haría susceptible al almidón agrio de yuca de riesgo de contaminación microbiana. En cuanto al pH no se aprecia distancia apreciable entre las tres muestras y entre éstas con los valores de la Tabla 1-4. A modo de comparación la Norma Técnica Colombiana 6066 (2014) señala que el almidón nativo de yuca, es aquel que no ha tenido ningún tipo de modificación, debe tener un valor de pH (en solución al 5%) entre 5 (mínimo) y 8 (máximo). Los valores de pH determinados en las muestras de los tres proveedores están por debajo del valor mínimo de la norma porque se trató de muestras de almidones modificados por procesos fermentativos. La acidez titulable aparentemente si exhibió un comportamiento diferenciado entre los tres proveedores, siendo destacable el de la muestra D. Esta variable no expresa solamente al ácido láctico sino que refleja todos los ácidos de la muestra en función de este ácido. Su valor puede ser indicador de la actividad metabólica de los microorganismos que usan el almidón como sustrato, lo que se debería ver reflejado en los cambios de la estructura del almidón agrio.

Para la evaluación de las diferencias entre las estructuras del almidón de las muestras se compararon sus perfiles de hinchamiento, los cuales son una medida indirecta de la fuerza de sus enlaces. Cuando se suministra energía mediante el aumento de temperatura los puentes de hidrógeno intermoleculares de las zonas amorfas se pueden romper dependiendo del ambiente estructural en el cual estén formados. Con la ruptura los almidones se hinchan gradualmente permitiendo la absorción irreversible y progresiva del agua (Lii *et al*., 1995). En la siguiente figura se presentan los perfiles de hinchamiento de las muestras de almidón agrio de yuca procedentes de las tres firmas comerciales.

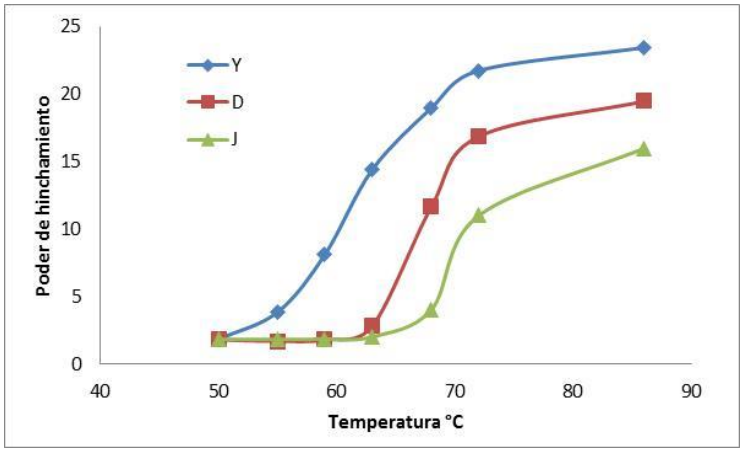

Figura 2-3 Perfiles del poder de hinchamiento del almidón agrio de yuca procedentes de tres firmas comerciales

En la figura anterior se puede observar que se presentó un comportamiento diferente en el poder de hinchamiento de las muestras con el incremento de la temperatura y con la procedencia del almidón agrio de yuca, lo cual se podría interpretar señalando que las fuerzas de enlace deben ser diferentes en estas muestras comerciales de almidón agrio. Se podría sugerir que el almidón de la muestra J requiere mayor energía térmica para relajar sus enlaces y permitir el hinchamiento por absorción de agua que las otras dos muestras, su temperatura de gelatinización media se encuentra alrededor de 70°C y presenta una estructura más cristalina. La muestra D presenta una temperatura de gelatinización media de 68°C, requiere más energía térmica para romper sus enlaces que la muestra Y. A diferencia de las otras dos muestras la muestra Y presenta enlaces más débiles que hacen que se alcance una relajación más rápida de sus enlaces y aumente su poder de hinchamiento a menores temperaturas, lo que conlleva a inferir que presenta cambios estructurales más marcados. De acuerdo con el análisis de la acidez la muestra D debería mostrar mayor debilidad en sus enlaces y por lo tanto presentar un poder de hinchamiento más rápido. Lo que indica que este almidón tuvo un procesamiento diferente posiblemente en la etapa de fermentación se le adicionó algún tipo de ácido.

En la última etapa de selección del proveedor se comparó el nivel tecnológico de las plantas de procesamiento. Se pudo identificar que la rallandería que produjo el almidón agrio de yuca D en su proceso tiene algunas etapas manuales, no tiene gradiente de

gravedad en el terreno, posee tanques de fermentación plásticos y de cemento. La rallandería que produjo la muestra J dejó de producir almidón agrio y se dedicó al almidón de yuca con destino a la industria de pegantes por lo que fue descartada. En el momento de realizar este análisis la rallandería Y tenía mecanización en las etapas de producción, aprovechaba el gradiente del terreno, disponía de dos tipos de fermentadores (plástico y cemento), poseía tanque de tratamiento de agua, su producción era constante y maquilaba almidón agrio de yuca para industrias de pasabocas reconocidas en Colombia. Con base en estos aspectos se seleccionó la rallandería proveedora de la muestra de la marca comercial Y como la mejor opción para el estudio.

2.3.2 Evaluación fisicoquímica del almidón seleccionado

Los resultados de los análisis de las variables evaluadas en el almidón de yuca producido en cada tipo de fermentador se describen en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 *Propiedades físico-químicas y funcionales del almidón de yuca*

Variable	Muestra Control	Tipo de Fermentador		Root MSE	Coeficiente variación (%)
		Cemento	Plástico		
Humedad-materiales volátiles (%m/m)	11,418[b]	13,713[a,b]	14,713[a]	1,0218	7,48
Acidez (% ácido láctico)	0,0231[b]	0,527[a]	0,573[a]	0,0870	19,55
pH	5,734[a]	3,665[b]	3,628[b]	0,3392	8,34
IAA (g gel/g muestra)	8,659	5,719	5,336	1,3055	21,22
ISA	2,924	4,939	5,246	2,0829	44,71
Poder de hinchamiento	8,799	5,869	5,465	1,3589	21,59
Capacidad de expansión (cm^3/g)	7,113[b]	7,996[a]	8,621[a]	0,4603	5,70
Amilosa (%FMA)	16,621[b]	23,746[a]	19,011[b]	1,0725	5,25
Almidón total %	88,85	85,96	85,30		

[a,b] Medias con letras distintas en la misma fila difieren al 95% de confianza del test de DMS de Fischer.

Los resultados registrados en la tabla anterior muestran varios hechos destacables. En primer lugar, se observa un comportamiento variable en el coeficiente de variación (CV). Algunas de las variables analizadas presentaron un CV que se podría considerar bajo; estas fueron el contenido de amilosa, la capacidad de expansión, la humedad-materiales volátiles, y el pH. Otras como la acidez, el IAA y el poder de hinchamiento tuvieron un CV medio, mientras que el ISA tuvo el mayor CV.

De las variables objeto de estudio el análisis de varianza muestra que el modelo propuesto, que incluyó como fuentes de variación el tipo de fermentador y el lote, no fue significativo para el IAA, ISA y el poder de hinchamiento (Pr > F 0,1090; 0,4671 y 0,1134, respectivamente), estas tres variables son las que presentaron los CV más elevados.

Los valores de CV para estas tres variables probablemente estuvieron asociados con diferencias en el tamaño de la partícula de las muestras sometidas a los procedimientos de análisis requeridos para estas determinaciones ya que estos no fueron normalizados entre las muestras. Según Bertolini (2010) las diferencias en el poder de hinchamiento se deben a diferencias entre tamaño de partícula, cristalinidad y contenido de complejo lípido-amilosa.

El análisis de varianza de las otras variables indicó que fue significativo el modelo propuesto. El mismo análisis señaló que excepto para la humedad y otros materiales volátiles hubo efecto significativo del tratamiento (tipo de fermentador). Para esta variable el nivel de probabilidad del efecto del tratamiento fue p>0,094. Finalmente, solo en la capacidad de expansión además del efecto del tratamiento el lote introdujo diferencias en sus valores.

Además de los análisis anteriores en el Laboratorio de Análisis Químico y Bromatológico se realizaron determinaciones de nitrógeno y de fósforo del almidón nativo y agrio. Para 12 muestras los resultados expresados en base seca fueron 0,4% m/m para el Nitrógeno. Para el fósforo los valores fueron 121,30 ± 19,22 ppm. Estos valores reflejan que las muestras de almidón de yuca no se pueden considerar importantes por sus aportes en estos componentes químicos.

Los resultados de la tabla anterior indican que la muestra control presentó menor acidez y capacidad de expansión que las muestras procedentes de los fermentadores. En igual dirección la muestra control tuvo mayor pH que las del almidón agrio de yuca, lo cual era de esperarse sí se tiene en cuenta que estas últimas fueron productos de procesos de fermentación. El contenido de amilosa en la muestra control fue semejante al del almidón agrio del fermentador plástico, pero 7,13 unidades menos que las procedentes del fermentador de cemento.

La comparación del almidón agrio de yuca procedente de los dos fermentadores permite concluir que no hubo diferencia para la acidez, el pH y la capacidad de expansión. Las condiciones en el fermentador de cemento condujeron a la generación de muestras con mayor contenido de amilosa (4,74 unidades porcentuales) que con el uso del fermentador plástico.

Sí se acepta el nivel de probabilidad ($p>0,094$) para el efecto del tratamiento (tipo de fermentador) sobre la humedad y otros materiales volátiles, se puede decir que la muestra control tuvo 3,30 unidades porcentuales menos de humedad que la del fermentador plástico pero fue igual al de las muestras procedentes del fermentador de cemento.

En el proceso de producción del almidón agrio de yuca las muestras se someten más o menos al mismo proceso de secado de aproximadamente seis horas de sol con eventuales volteos (Alarcon *et al*., 1998) o hasta tres días si el día es nublado. Para el caso del estudio se podría señalar que las muestras del control como las del almidón agrio no se diferenciaron de manera importante en su contenido de humedad. En las condiciones de rallandería el control sobre el contenido de humedad se hace de forma manual amasando la muestra y soltándola; si la muestra se disgrega es indicativo que se cumplió el tiempo de sol.

Durante la etapa de fermentación con la aparición de ácidos orgánicos como el acético, propiónico, butírico, fórmico, succínico, valérico y principalmente el ácido láctico (Rivier, 2001), provenientes del metabolismo de los azúcares fácilmente asimilables por los microrganismos amiloliticos (Ascheri *et al*., 1995) aumenta la acidez. Los ácidos orgánicos producidos también contribuyen con la reducción significativa del pH (Marcon

et al., 2009). En la legislación del Brasil por ejemplo se utiliza la diferencia en la acidez entre el almidón nativo y el almidón agrio de yuca como elemento diferenciador de la calidad del almidón (Demiate., 1999).

En la Figura 2-4 se presentan fotografías de muestras de almidón de yuca sometidas a horneo para la evaluación de la capacidad de expansión.

Figura 2-4 Fotografías de muestras de almidón de yuca sometidas al proceso de horneo conducente a la evaluación de la capacidad de expansión. Almidón nativo (arriba), almidón agrio de fermentador de cemento (medio), almidón agrio de fermentador plástico (inferior)

La capacidad de expansión del almidón está asociada con la degradación oxidativa del gránulo por la exposición del almidón fermentado a la radiación ultravioleta de los rayos solares durante el secado. Sin embargo, no se tiene elucidado químicamente el tipo de polímero que forma la red responsable de esta expansión (Demiate *et al*., 2000). Esta variable constituye el principal criterio de evaluación de la calidad del almidón agrio de yuca para su comercialización en panadería (Tischer, 2004). El buen desempeño de este se observa cuando con él se obtienen productos con estructura alveolar suave (Marcon, 2009), característica directamente relacionada con su volumen especifico expresado en cm^3/g.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 2-3 se pudo establecer la existencia de diferencia en la capacidad de expansión entre el almidón nativo y los procedentes de los fermentadores, pero entre los dos fermentadores no hubo diferencia. La Figura 2-4 presenta el comportamiento de la capacidad de expansión para cada repetición de las muestras de almidón. Los resultados del estudio están de acuerdo con los registrados por Alvarado *et al* (2013) y evidencian que durante el horneo el almidón agrio de yuca tuvo una capacidad de expansión mayor que el almidón nativo debido a las transformaciones estructurales ocurridas durante su procesamiento.

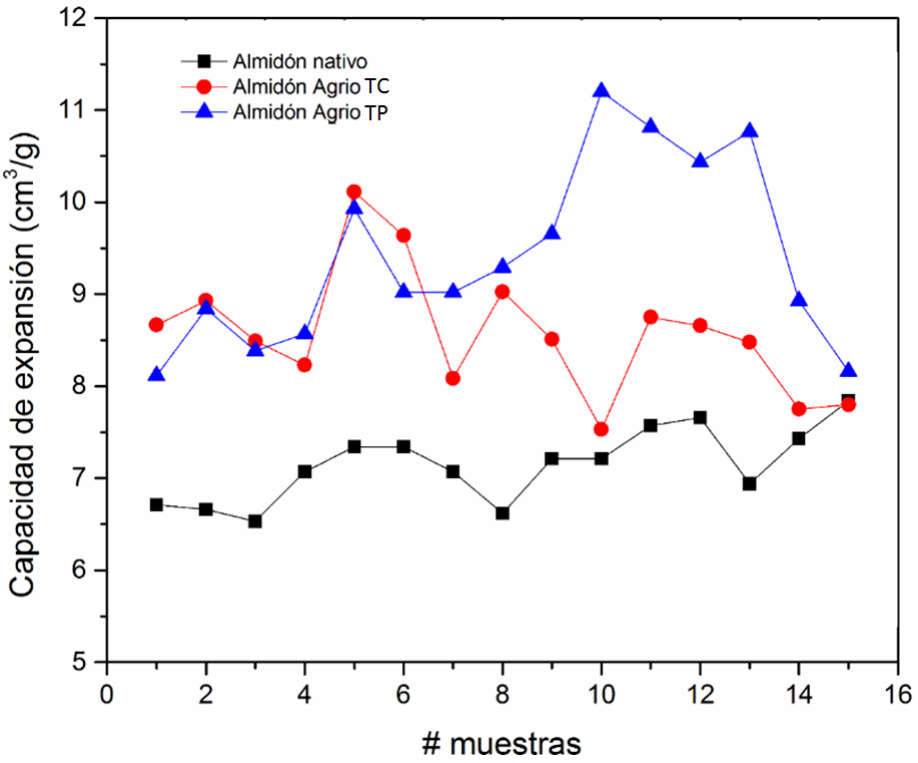

Figura 2-5 Comportamiento de la capacidad de expansión para cada repetición de las muestras de almidón nativo y agrio de yuca (TC = tanque de cemento y TP= tanque plástico).

Las estimaciones realizadas en el presente estudio permitieron establecer que la capacidad de expansión o el poder de panificación del almidón fue de 8 a 10 cm^3/g, el cual lo ubica en la categoría de calidad media (grado 2) según la escala acordada en Colombia entre los productores de almidón agrio de yuca usando el método CIAT (Fernández *et al*., 2002).

Aunque existen evidencias que hay diferencia en la microbiota de los fermentadores de cemento y plástico (Chiquiza *et al*., 2016) debido a que las características del diseño de estos pueden cambiar las condiciones ambientales para favorecer o inhibir el crecimiento de algunas poblaciones de microorganismos (Chandrashekhar *et al*., 2010), en este estudio no se encontró diferencia en la calidad funcional, evaluada por la capacidad de expansión, del almidón agrio de yuca producido por ambos fermentadores. Esto significaría que en los dos tratamientos hubo microorganismos que cambiaron la estructura del almidón en la misma forma o que, posiblemente, esta transformación

puede ser llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos debido a la amplia microbiota con capacidad amilolitica encontrada en este proceso de fermentación (Lacerda *et al*., 2005), En este estudio no se evaluó el tipo de microorganismos de ambos fermentadores ni otras características típicas del almidón agrio, como el aroma y el sabor, dadas por microorganismos específicos.

Un componente que se introdujo en el estudio fue la realización de un análisis de correlación lineal simple entre varias de las variables medidas, las cuales desde el punto de vista de la literatura se encuentran asociadas. En la siguiente tabla se presentan los resultados de los valores de correlación determinados entre algunas de las variables estudiadas.

Tabla 2-4 *Valores del coeficiente de correlación entre algunas variables determinadas en el almidón de yuca nativo y agrio procedente de dos tipos de fermentadores*

Variables	pH	ISA	Capacidad de expansión	Poder de hinchamiento
Amilosa	r=-0,6670 p=0,0351 (n=10)	r=0,7033 p<0,001 (n=45)	r=-0,3350 p=0,0246 (n=45)	r=-0,2962 p=0,4063 (n=10)
pH	-	-	-	r=0,6018 p=0,066 (n=10)
ISA	-	-	r=-0,1039 p=0,4972 (n=45)	-

Antes de analizar los resultados registrados en la tabla anterior es necesario llamar la atención en tres aspectos de procedimiento en el cálculo de los valores de correlación: no se realizaron cálculos de correlación para todas las variables, no se utilizó el mismo tamaño de muestra para establecer dichos cálculos y no se discriminó entre el almidón nativo y el agrio de yuca o modificado por la fermentación como tampoco de acuerdo con el tipo de tanque de fermentación.

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior se pueden establecer los siguientes tipos de asociaciones o relaciones entre las variables seleccionadas. Entre el contenido de amilosa del almidón de yuca, tanto nativo como modificado, estuvo relacionado de

manera positiva con el ISA y de forma negativa con el pH, tuvo una baja asociación con la capacidad de expansión y en nada se relacionó con el poder de hinchamiento. Por otro lado, el pH y el poder de hinchamiento se relacionaron de manera positiva. Finalmente, en las condiciones en las que se realizó el estudio no hubo asociación entre la capacidad de expansión y el ISA.

Según Li (2001) el índice de solubilidad y el poder de hinchamiento están asociados con el contenido y la longitud de la cadena de amilopectina en el almidón y con la presencia de cristalitos. Por su parte Marcon (2009) afirmó que el almidón nativo de yuca tiene menor solubilidad debido a la presencia de amilosa no hidrolizada en la región cristalina del gránulo, mientras que el almidón agrio libera parte de la amilosa luego de una despolimerización que hace que la solubilidad aumente. Esto significaría que entre más amilosa tenga el almidón menor será el poder de hinchamiento. El mismo autor estableció valores positivos en la correlación entre la capacidad de expansión o poder de panificación con el poder de hinchamiento, factor ácido, pH, viscosidad intrínseca y volumen específico; de ellas el coeficiente de correlación más alto fue con el volumen específico. De igual forma también estableció que un almidón agrio con buena capacidad de expansión tendría un pH entre 3,47 y 4,18. En este estudio los almidones agrios procedentes de ambos fermentadores presentaron valores de pH de 3,665 y 3,628 los cuales no fueron diferentes y generaron capacidades de expansión que tampoco fueron diferentes con valores de 7,996 y 8,621 cm^3/g.

Para su procesamiento, en un almidón es importante el contenido de amilosa por el efecto que ejerce en las propiedades reológicas, en la modificación de la textura de los productos finales y porque nutricionalmente contribuye a aumentar la porción del almidón lentamente digestible y resistente (Blazek *et al*., 2008). En este estudio aunque, como se indicó, fue baja, pero significativa, la correlación entre el contenido de amilosa y el poder de expansión, este resultado envía señales para investigar más al respecto puesto que en otros estudios se ha establecido que existe un grado significativo de asociación inversa entre ambas variables (Alvarado *et al.*, 2013). Por su parte Sasaki y Matsuki (1998) también encontraron que ambas variables se relacionan de manera inversa, debido a que la amilosa actúa como un inhibidor del hinchamiento (Lii *et al*., 1996).

La existencia de una relación positiva, de magnitud media a alta y significativa entre el contenido de amilosa y el ISA se puede explicar considerando que durante el calentamiento del almidón en un exceso de agua, la amilosa se lixivia pasando a la fracción soluble, haciendo que el peso del almidón soluble sea mayor entre más amilosa haya.

Algunos autores han explicado la correlación que se presenta entre el pH y el contenido de amilosa en los siguientes términos. La disminución del pH se debe al aumento de los ácidos orgánicos (Adegunwae *et al*., 2011) lo que ocasiona la hidrólisis de la amilosa y de la amilopectina afectando la microestructura del almidón (Chen *et al*., 2017), aumentando la proporción de amilosa. Otros autores como Hirashima *et al* (2005) y Mali *et al* (2003) han encontrado alteraciones en las propiedades funcionales de almidones (viscosidad, gelatinización y propiedades de la pasta) por efecto del pH.

Con el fin de relacionar las variables fisicoquímicas del almidón nativo y agrio de yuca con la composición química y la estructura granular del almidón, se realizaron análisis de espectrometría de infrarrojo y de microscopia electrónica de barrido (SEM). La primera, proporciona información de los grupos funcionales y ordenamiento estructural, en tanto que la segunda suministra información de la morfología superficial y el tamaño de los gránulos.

El análisis de las imágenes SEM reveló que los gránulos de almidón nativo de yuca presentaron formas irregulares ovaladas, redondas y truncadas. En los almidones evaluados, nativos y agrios, los tamaños de partícula variaron entre 3,0 y 22,0 µm (Figura 2-6). Esta morfología y los rangos de tamaño de partícula observados en el estudio coinciden con lo registrado para este tipo de almidón por Annison (1994). Independiente del tipo de fermentador los gránulos del almidón agrio de yuca presentaron mayor irregularidad en su forma comparados con el almidón nativo, lo cual se debe probablemente al proceso enzimático que se dio en la fermentación. La Figura 2-6 solo presenta las imágenes correspondientes al almidón nativo y al agrio procedente del fermentador plástico porque para ambos fermentadores el almidón presentó morfología similar.

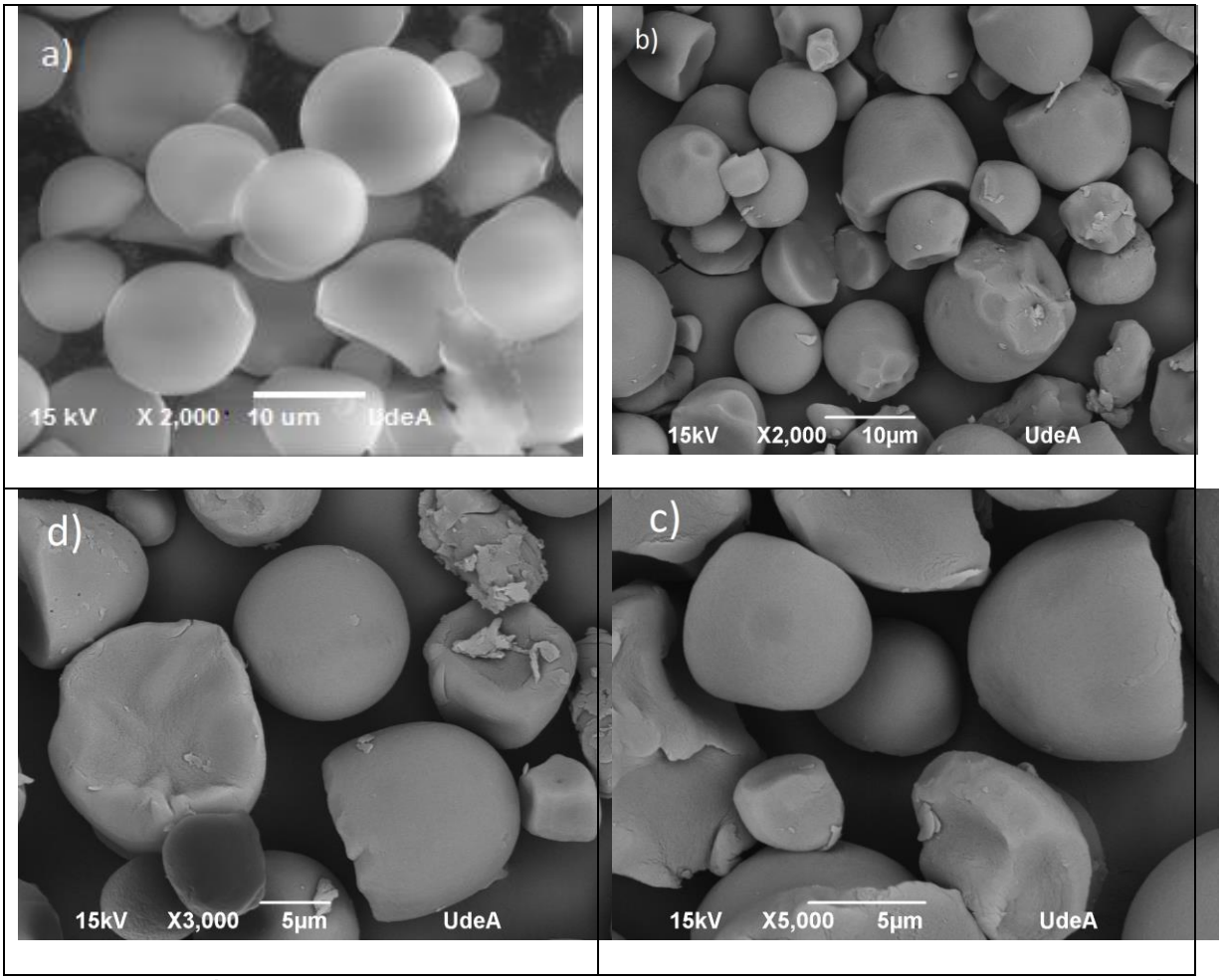

Figura 2-6 Imágenes SEM a diferentes magnificaciones de las muestras de almidón nativo (a) y agrio de yuca (b, c y d) procedentes del fermentador plástico.

En varios estudios se ha indicado que la superficie de los gránulos de almidón se afecta de diferentes maneras por la acción enzimática. Estas formas de acción incluyen la perforación por agujeros, la erosión tipo esponja, los orificios de tamaño medio, los orificios individuales en los gránulos y la erosión superficial. Dependiendo de la enzima y de la variedad del almidón puede haber erosión de toda la superficie del gránulo (exo-corrosión) o degradación de los canales en lugares específicos en la superficie con proyecciones hacia el centro (endo-corrosión). Los almidones de trigo, cebada y centeno tienen zonas susceptibles específicas que dan lugar a cavidades como resultado de la endo-corrosión. Las cavidades se agrandan y forman numerosos canales dentro del

gránulo debilitando su estructura. Eventualmente los gránulos se fragmentan dejando atrás el almidón residual (Dona, 2010; Sujka, 2007). Para el almidón agrio de yuca se evidencia que la degradación enzimática de la superficie (exo-corrosión) no es uniforme debido a la presencia de aristas polihedrales y hendiduras superficiales; tampoco se observó la formación de grandes canales hacia el interior de la partícula.

La Figura 2-7 recoge información de los espectros FTIR (Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier) para las muestras de almidón nativo y agrio de los tratamientos evaluados.

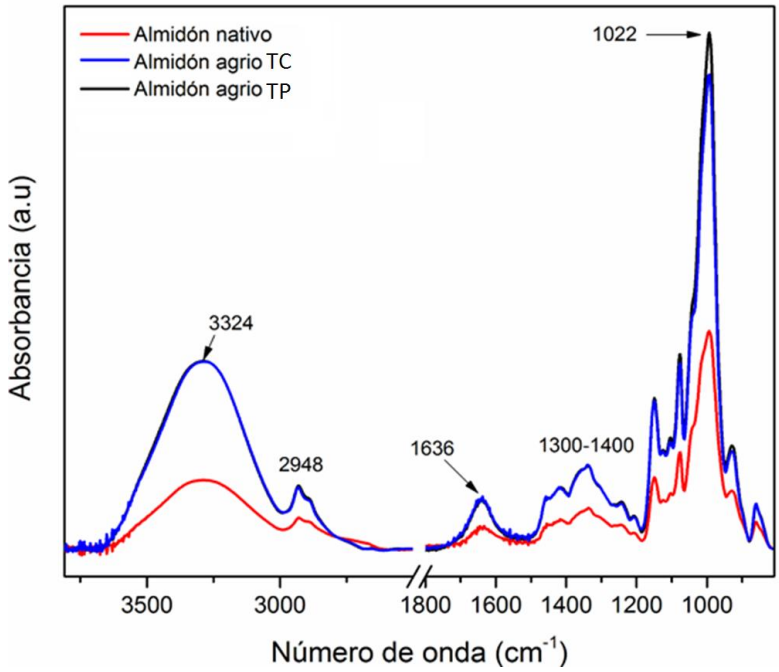

Figura 2-7 Espectros FTIR de las muestras de almidón nativo y agrio de yuca procedente de dos tipos de fermentadores (TC = tanque de cemento; TP= tanque plástico).

Dentro de las señales más importantes de los espectros registrados en la figura anterior se pueden destacar las siguientes: la banda centrada a 3290 cm^{-1} es atribuida a vibraciones de estiramiento inter e intramolecular de enlaces O-H en compuestos polihidroxilados o ácidos carboxílicos. La banda a 2926 cm^{-1} es atribuida a las vibraciones de estiramiento del enlace C-H de especies alifáticas y la banda a 1636 cm^{-1} es atribuida a la vibración de doblamiento del agua (Ashwar, 2016; Demiate, 2000; Mei, 2015). Algunos autores como Demiate (2000) atribuyeron este estiramiento a la vibración

anti-simétrica del enlace tipo carboxilato $(-COO)_2$. Las bandas en la región de huella dactilar entre 1365 -1413 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de flexión de aleteo y tijereo del enlace C-H del componente alifático. Para el estudio en particular las intensidades de los grupos de ácidos carboxílicos en las muestras de almidón agrio, independientemente del tipo de fermentador, aumentaron con la hidrólisis enzimática, lo cual se asocia muy bien con el aumento en la intensidad de la señal de absorción del agua a 1636 cm^{-1}. Lo anterior sugeriría que el almidón agrio debió haber sufrido un cambio químico que favorecería la retención de agua debido a la formación de puentes de hidrogeno; no obstante en este estudio no se evidenció esta relación de causalidad si se observa que no hubo diferencia en el IAA entre los almidones nativo y agrios procedentes de los dos tipos de fermentadores, pero sí parece explicar la mayor capacidad de expansión en el horneo de los almidones agrios en comparación con el nativo (Tabla 2-3).

La información de los espectros FTIR de los almidones evaluados en este trabajo explica la mayor parte de las variables fisicoquímicas registradas en la Tabla 2-3. Por ejemplo, los valores de acidez y de pH para el almidón nativo y agrio son consistentes con la intensidad de las señales asociadas a los ácidos carboxílicos (3324 cm^{-1}, 1636 cm^{-1} y 1022 cm^{-1}). La metodología del análisis de los espectros mediante FTIR permite llegar a la misma conclusión a la que se llegó cuando se compararon los resultados de las variables fisicoquímicas entre los dos tipos de fermentadores (Tabla 2-3); es decir, la calidad y características del almidón agrio de yuca no varía significativamente con el tipo de fermentador evaluado. Lo anterior sugiere que la técnica de infrarrojo es lo suficientemente robusta, practica, rápida y económica para evaluar la calidad integral del almidón agrio de yuca. También se ha demostrado que la técnica ATR-FTIR es bastante sensible a los cambios estructurales (ordenamiento de corto alcance) del almidón a nivel molecular tales como la conformación de la cadena de almidón, la helicidad, la cristalinidad en las regiones exteriores de los gránulos y los procesos de retrogradación (Ashwar, 2016; Demiate, 2000; Mei, 2015).

Con el fin de estudiar a fondo el efecto de la hidrólisis enzimática sobre el ordenamiento estructural del almidón agrio de yuca se corrigieron los espectros en línea base entre 800 y 1200 cm^{-1}. Posteriormente los espectros fueron deconvolucionados usando varias

curvas de Gauss con el fin de separar las señales que estaban superpuestas. Para este análisis se centro la atención en dos bandas (a 1047 cm^{-1} y a 1022 cm^{-1}) que estaban solapadas las cuales corresponden a modos de flexión C-O-H asociados con los dominios cristalinos y amorfos del almidón, respectivamente. (Capron, 2007). En las Figuras 2-8 y 2-9 se presentan los resultados generados con este procedimiento. La Figura 2-8 contiene la información de los espectros con los valores crudos de las muestras de almidón agrio de yuca procedentes de los dos fermentadores y del almidón nativo en la región de ordenamiento estructural. La Figura 2-9 por su parte presenta el espectro deconvolucionado solo de la muestra de almidón agrio de yuca obtenido del fermentador de plástico.

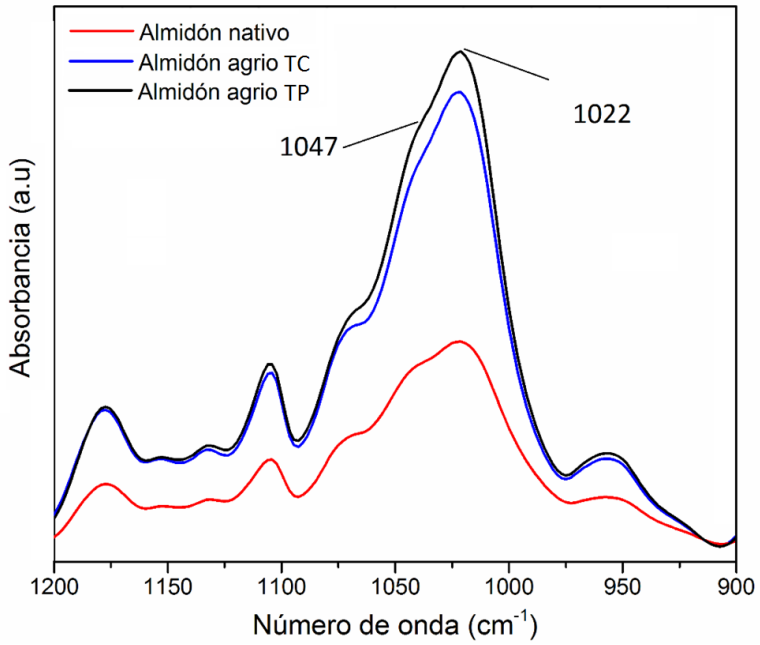

Figura 2-8 Región de ordenamiento estructural para las muestras de almidón nativo y agrio de yuca originado en los dos fermentadores (TC = tanque de cemento; TP= tanque plástico).

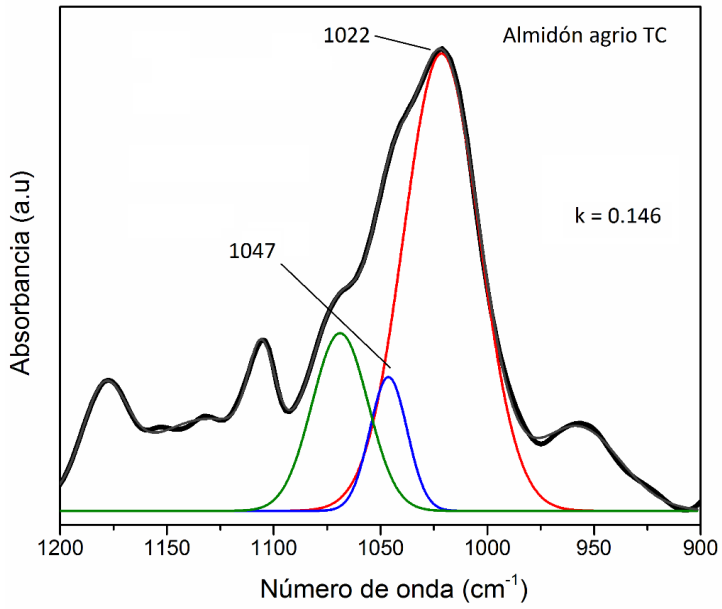

Figura 2-9 Espectro deconvolucionado de la región de ordenamiento estructural del almidón agrio de yuca procedentes del fermentador de plástico.

En términos generales se puede observar que los almidones estudiados presentan espectros con patrones similares; sin embargo las intensidades de las bandas son menores para el almidón nativo. La relación de intensidades entre las bandas 1047cm^{-1}/1022cm^{-1} se usa para expresar el orden molecular en los almidones (Shah *et al*., 2017) Las intensidades se pueden medir en relación a la altura o al área. Van Soest *et al* (1995) sugirieron medirlas con base en la altura. En este estudio se estableció la relación con base en las áreas debido a que las señales fueron deconvolucionadas y se diferenciaban unas de otras. Los valores calculados para el índice de orden molecular (k) fueron 0,113; 0,146 y 0,142 para el almidón nativo, agrio fermentado en tanque plástico y en tanque de cemento respectivamente. El almidón agrio producido por ambos fermentadores presentó órdenes moleculares muy similares y diferente al del almidón nativo, resultado que está en la misma tendencia con los de pH, acidez y la capacidad de expansión obtenidos en las determinaciones fisicoquímicas, según la cual no hubo diferencia entre los almidones agrios de yuca procedentes de los dos fermentadores pero sí entre estos y el almidón nativo. El menor valor de k para el almidón nativo el valor de k fue menor, lo que indica que el proceso de fermentación está causando un aumento relativo en el orden estructural o cristalino debido a que parte del almidón amorfo de la superficie del gránulo

fue degradada; después de esta etapa el almidón residual se hace más resistente al ataque enzimático debido a la falta de canales o intersticios por donde pueda ocurrir la reacción. Este resultado está de acuerdo con los obtenidos por la microscopia electrónica de barrido (SEM) mediante la cual se observó que la degradación ocurre por exo-corrosión sin la formación de canales.

Algunos autores encontraron que la intensidad de la banda a 1047 cm^{-1} es mayor en almidones modificados que en los nativos. Chung (2009) observó resultados similares almidón de maíz precocido en el que el aumento en la intensidad de la banda a 1047 cm^{-1} confirmó un empaquetamiento más eficiente de la doble hélice dentro del dominio cristalino del almidón. Resultados similares fueron observados por Van Soest (1995) en el almidón de papa según los cuales el aumento en la intensidad de la banda a 1022 cm^{-1} indicó pérdida de cristalinidad, mientras que el aumento en la intensidad a 1047 cm^{-1} implicó el aumento de la cristalinidad.

Conclusiones de capítulo

El análisis de los resultados del estudio se orientaron a la evaluación de las características fisicoquímicas y de funcionalidad y la caracterización de la estructura y la morfología del almidón nativo y del agrio de yuca como producto derivado de la fermentación por vía húmeda realizada bajo las condiciones de producción propias de una rallandería las cuales aunque se rigen por algunos controles a equipos y procesos en modo alguno se pueden considerar condiciones estandarizadas.

Los resultados de las variables fisicoquímicas mostraron un comportamiento variable en sus coeficientes de variación (CV), hecho que podría explicar por qué no hubo diferencia entre los dos procesos de fermentación, el cual a su vez se podría articular las condiciones poco estandarizadas que tiene la rallandería para la selección de la materia prima y el mismo proceso de producción.

De las variables objeto de estudio el análisis de varianza mostró que el modelo propuesto, que incluyó como fuentes de variación el tipo de fermentador y el lote, no fue significativo para el IAA, ISA y el poder de hinchamiento, variables que presentaron los CV más elevados.

El análisis de varianza señaló que excepto para la humedad y otros materiales volátiles hubo efecto significativo del tratamiento (tipo de fermentador). Solo en la capacidad de expansión además del efecto del tratamiento el lote introdujo diferencias en sus valores.

Los resultados indicaron que la muestra control presentó menor acidez y capacidad de expansión que las muestras procedentes de los fermentadores. En igual dirección la muestra control tuvo mayor pH que las del almidón agrio de yuca. El contenido de amilosa en la muestra control fue semejante al del almidón agrio del fermentador plástico, pero 7,13 unidades menos que las procedentes del fermentador de cemento.

La comparación del almidón agrio de yuca procedente de los dos fermentadores permite concluir que no hubo diferencia para la acidez, el pH y la capacidad de expansión. Las condiciones en el fermentador de cemento condujeron a la generación de muestras con

mayor contenido de amilosa (4,74 unidades porcentuales) que con el uso del fermentador plástico.

El análisis de los resultados de las correlaciones permitió establecer diferentes tipos de asociaciones entre las variables seleccionadas. A modo de resumen se pudo establecer que el contenido de amilosa del almidón de yuca, tanto nativo como modificado, estuvo relacionado de manera positiva con el ISA y de forma negativa con el pH, tuvo una baja asociación con la capacidad de expansión y en nada se relacionó con el poder de hinchamiento.

La técnica ATR-FTIR además de proporcionar información sobre el ordenamiento estructural del almidón, el cual fue mayor para el almidón agrio, también permitió llegar a la misma conclusión obtenida en la evaluación de las variables fisicoquímicas cuando se compararon los resultados entre los almidones agrios del fermentador de cemento y del plástico. La técnica es robusta, practica, rápida y económica para evaluar la calidad integral del almidón agrio de yuca.

El análisis de las imágenes SEM reveló que los gránulos de almidón nativo de yuca presentaron formas irregulares ovaladas, redondas y truncadas. En los almidones evaluados, tanto nativos como agrios, los tamaños de partícula variaron entre 3,0 y 22,0 µm). Tanto la morfología como los rangos de tamaño de partícula observados en el estudio coinciden con los registrados para este tipo de almidón por otros autores. Independiente del tipo de fermentador los gránulos del almidón agrio de yuca presentaron mayor irregularidad en su forma comparados con el almidón nativo, lo cual se debe probablemente al proceso enzimático que se dio en la fermentación.

Referencias

AACC-10-05. (2000). *AACC. American Association of Cereal Chemist. Approved Methods of the AACC.* St. Paul, MN.EE.UU.: The American Association of Cereal Chemists, Décima Edición.

Adegunwa, M. O., Sanni, L. O., & Maziya-Dixon, B. (2011). Effects of fermentation length and varieties on the pasting properties of sour cassava starch. *African Journal of Biotechnology*, *10*(42), 8428-8433.

Alarcon, F. D. (1998). *Almidon agrio de yucca en Colombia. Tomo1: Producción y recomendaciones.* Cali: CIAT.

Alvarado, Alvarado, P. M., Grosmaire, L., Dufour, D., Toro, A. G., Sánchez, T., Calle, F., Tran, T. (2013). Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. *Carbohydrate polymers, 98(1),* 1137-1146.

Anderson, Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., & Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. *Cereal Science Today, 14(1),* 4-12.

Annison, G., & Topping, D. L. (1994). Nutritional role of resistant starch: chemical structure vs physiological function. *Annual review of nutrition, 14(1),* 297-320.

AOAC. (2005). *Association of Official Analytical Chemist. Official Methods of Analysis.* Washington: AOAC, USA.

Ascheri, D. P. R., & Vilela, E. R. (1995). Alterações do polvilho de mandioca pela fermentação, no fabrico de biscoitos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 30(2)*, 269-279.

Ashwar, B. A., Gani, A., Wani, I. A., Shah, A., Masoodi, F. A., & Saxena, D. C. (2016). Production of resistant starch from rice by dual autoclaving-retrogradation treatment: Invitro digestibility, thermal and structural characterization. *Food Hydrocolloids,* 56, 108-117.

Bertolini, A. C., Mestres, C., Raffi, J., Buléon, A., Lerner, D., & Colonna, P. (2001). Photodegradation of cassava and corn starches. *Journal of agricultural and food chemistry, 49(2),* 675-682.

Blazek, J., & Copeland, L. (2008). Pasting and swelling properties of wheat flour and starch in relation to amylose content. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 380-387.

Brooker, B. E. (1996). The role of fat in the stabilisation of gas cells in bread dough. *Journal of Cereal Science 24(3),* 187-198.

Capron, I., Robert, P., Colonna, P., Brogly, M., & Planchot, V. (2007). Starch in rubbery and glassy states by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers, 68(2),* 249-259.

Chiquiza-Montaño, L. N., Montoya, O. I., Restrepo, C., & Orozco-Sánchez, F. (2016). Estudio de la Microbiota del Proceso de Producción de Almidón Agrio de Yuca. *Información tecnológica, 27(5)*, 03-14.

Chandrashekhar, H., & Rao, J. V. (2010). An Overview of fermenter and the design considerations to enhance its productivity. *Pharmacologyon-line*, 261-301.

Chen, P., Xie, F., Zhao, L., Qiao, Q., & Liu, X. (2017). Effect of acid hydrolysis on the multi-scale structure change of starch with different amylose content. *Food Hydrocolloids*, *69*, 359-368.

Chung, H. J., Liu, Q., & Hoover, R. (2009). Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydrate Polymers, 75(3),* 436-447.H. J. (2009).

Demiate, I. M., Dupuy, N., Huvenne, J. P., Cereda, M. P., & Wosiacki, G. (2000). Relationship between baking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers, 42(2),* 149-158.

Demiate, I. M. (1999). Organic acid profile of commercial sour cassava starch. *Food Science and Technology*, *19(1),* 131-135.

Dona, A. C., Pages, G., Gilbert, R. G., & Kuchel, P. W. (2010). Digestion of starch: In vivo and in vitro kinetic models used to characterise oligosaccharide or glucose release. *Carbohydrate Polymers, 80(3),* 599-617.

Fernández, A., Zakhia, N., Ruiz, R., & Trujillo, J. M. (2002). Desarrollo de un método sencillo para medir la calidad del almidón agrio de yuca: impacto del método sobre la agroindustria rural en el departamento del Cauca (Colombia).

Gottret, M., Henry, G., & Dufour, D. (2003). Caracterización de la agroindustria de procesamiento de almidón agrio en el departamento del Cauca. Colombia: proyecto de desarrollo de agroempresas rurales, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira, 21p.

Hirashima, M., Takahashi, R., & Nishinari, K. (2005). Effects of adding acids before and after gelatinization on the viscoelasticity of cornstarch pastes. *Food hydrocolloids*, *19*(5), 909-914.

Lacerda, I. C., Miranda, R. L., Borelli, B. M., Nunes, Á. C., Nardi, R. M., Lachance, M. A., & Rosa, C. A. (2005). Lactic acid bacteria and yeasts associated with spontaneous fermentations during the production of sour cassava starch in Brazil. *International journal of food microbiology*, 105(2), 213-219.

LII, C. Y., Shao, Y. Y., & Tseng, K. H. (1995). Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. *Cereal Chemistry*, 72(4), 393-400.

Lii, C. Y., Tsai, M. L., & Tseng, K. H. (1996). Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. *Cereal Chemistry*, 73(4), 415-420.

Li, J. Y., & Yeh, A. I. (2001). Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *Journal of Food Engineering, 50(3),* 141-148.

Mali, S., Ferrero, C., Redigonda, V., Beleia, A. P., Grossmann, M. V. E., & Zaritzky, N. E. (2003). Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (Dioscorea alata) starch pastes stability. *LWT-Food Science and Technology, 36(5),* 475-481.

Marcon, M. J. A., Vieira, G. C. N., Simas, K. N. D., Santos, K., Vieira, M. A., Amboni, R. D. D. M. C., & Amante, E. R. (2007). Effect of the improved fermentation on physicochemical properties and sensorial acceptability of sour cassava starch. *Brazilian Archives of Biology and technology, 50(6),* 1073-1081.

Marcon, M. J. A., Kurtz, D. J., Raguzzoni, J. C., Delgadillo, I., Maraschin, M., Soldi, V., ... & Amante, E. R. (2009). Expansion properties of sour cassava starch (*polvilho azedo*): variables related to its practical application in bakery. *Starch-Stärke, 61(12),* 716-726.

McGrance, S. J., Cornell, H. J., & Rix, C. J. (1998). A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products. *Starch-Stärke, 50(4),* 158-163.

Mei, J. Q., Zhou, D. N., Jin, Z. Y., Xu, X. M., & Chen, H. Q. (2015). Effects of citric acid esterification on digestibility, structural and physicochemical properties of cassava starch. *Food chemistry*, 187, 378-384.

Ospina, B., & Ceballos, H. (2002). La yuca en el tercer Milenio: Sistemas Modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. 327. CIAT.

Rivier, M. M. (2001). Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomo 2. Cali: Publicación CIAT.

Sasaki, T., & Matsuki, J. (1998). Effect of wheat starch structure on swelling power. *Cereal Chemistry*, 75, 525–529.

Shah, A., Masoodi, F. A., Gani, A., & Ashwar, B. A. (2017). Physicochemical, rheological and structural characterization of acetylated oat starches. *LWT-Food Science and Technology*, 80, 19-26.

Sujka, M., & Jamroz, J. (2007). Starch granule porosity and its changes by means of amylolysis. *International agrophysics, 21(1),* 107-113.

Tischer, I. M. (2004). Influencia de la localización del almidón nativo de yuca en el canal de sedimentación sobre la calidad del almidón agrio. *Ingeniería y Competitividad*, 26-34.

Van Soest, J. J., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegenthart, J. F. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate research,* 279, 201-214.

Anexo

Salida de datos estadísticos del programa SAS

The GLM Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values
TRATAMIENTO	3	0 1 2
LOTE	4	1 2 3 4

Number of observations 10

The GLM Procedure

Dependent Variable: HUMEDAD

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	21.67589641	4.33517928	4.15	0.0463
Error	4	4.17619432	1.04404858		
Corrected Total	9	25.85209073			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	HUMEDAD Mean
0.838458	7.483465	1.021787	13.65393

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	7.17345668	2.39115223	2.29	0.2202
TRATAMIENTO	2	9.43873198	4.71936599	4.52	0.0941

Dependent Variable: ACIDEZ

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0.50971544	0.10194309	13.50	0.0129
Error	4	0.03021634	0.00755409		
Corrected Total	9	0.53993178			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ACIDEZ Mean
0.944037	19.55110	0.086914	0.444549

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	0.06128624	0.02042875	2.70	0.1803
TRATAMIENTO	2	0.32330049	0.16165024	21.40	0.0073

Dependent Variable: ACIDEZ Miliequivalentes

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0.00157320	0.00031464	13.50	0.0129
Error	4	0.00009326	0.00002332		
Corrected Total	9	0.00166646			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ACIDEZMEQ Mean
0.944037	19.55110	0.004829	0.024697

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	0.00018916	0.00006305	2.70	0.1803
TRATAMIENTO	2	0.00099784	0.00049892	21.40	0.0073

Dependent Variable: pH

Sum of

Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	7.04946876	1.40989375	12.26	0.0154
Error	4	0.46014058	0.11503515		
Corrected Total	9	7.50960934			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pH Mean
0.938726	8.343925	0.339168	4.064853

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	0.04463901	0.01487967	0.13	0.9377
TRATAMIENTO	2	5.67434749	2.83717375	24.66	0.0056

Dependent Variable: AMILOSA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	82.63380797	16.52676159	14.37	0.0115
Error	4	4.60094348	1.15023587		
Corrected Total	9	87.23475145			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	AMILOSA Mean
0.947258	5.250414	1.072490	20.42678

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	1.56146325	0.52048775	0.45	0.7296
TRATAMIENTO	2	75.23377276	37.61688638	32.70	0.0033

Dependent Variable: IAA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	32.59330436	6.51866087	3.82	0.1090
Error	4	6.81819747	1.70454937		
Corrected Total	9	39.41150183			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	IAA Mean
0.827000	21.21652	1.305584	6.153621

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	16.60522549	5.53507516	3.25	0.1425
TRATAMIENTO	2	11.62606685	5.81303342	3.41	0.1367

Dependent Variable: ISA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	24.43755812	4.88751162	1.13	0.4671
Error	4	17.35492121	4.33873030		
Corrected Total	9	41.79247933			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	ISA Mean
0.584736	44.71304	2.082962	4.658511

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
LOTE	3	16.72394174	5.57464725	1.28	0.3936
TRATAMIENTO	2	8.79085893	4.39542947	1.01	0.4406

Dependent Variable: PHINCHAMIENTO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	34.39855493	6.87971099	3.73	0.1134
Error	4	7.38676717	1.84669179		

```
Corrected Total              9     41.78532210

                R-Square     Coeff Var      Root MSE    PHINCHAMIENTO Mean
                0.823221      21.59297      1.358930              6.293393

Source                       DF     Type III SS     Mean Square    F Value    Pr > F
LOTE                          3     18.37532543      6.12510848       3.32    0.1385
TRATAMIENTO                   2     11.49238785      5.74619392       3.11    0.1531

Dependent Variable: CAPEXP

                                        Sum of
Source                       DF         Squares     Mean Square    F Value    Pr > F
Model                         5     13.53833125      2.70766625      12.78    0.0143
Error                         4      0.84735347      0.21183837
Corrected Total               9     14.38568472

                  R-Square     Coeff Var      Root MSE    CAPEXP Mean
                  0.941097      5.703761      0.460259       8.069396

Source                       DF     Type III SS     Mean Square    F Value    Pr > F
LOTE                          3     10.46667682      3.48889227      16.47    0.0103
TRATAMIENTO                   2      6.64526631      3.32263316      15.68    0.0128

                              t Tests (LSD) for HUMEDAD

                        Alpha                            0.05
                        Error Degrees of Freedom            4
                        Error Mean Square            1.044049
                        Critical Value of t           2.77645
                        Least Significant Difference   2.3163
                        Harmonic Mean of Cell Sizes         3

                           NOTE: Cell sizes are not equal.
                Means with the same letter are not significantly different.

                    t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

                               A       14.7131      4    2
                           B   A       13.7129      4    1
                           B           11.4177      2    0

                                    The GLM Procedure

                                  t Tests (LSD) for ACIDEZP

                        Alpha                            0.05
                        Error Degrees of Freedom            4
                        Error Mean Square            0.007554
                        Critical Value of t           2.77645
                        Least Significant Difference    0.197
                        Harmonic Mean of Cell Sizes         3

                           NOTE: Cell sizes are not equal.

                Means with the same letter are not significantly different.

                  t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO
                           A       0.57306      4    2
                           A       0.52679      4    1
                           B       0.02305      2    0

                                    The GLM Procedure

                                t Tests (LSD) for ACIDEZMEQ
```

```
Alpha                             0.05
Error Degrees of Freedom             4
Error Mean Square             0.000023
Critical Value of t            2.77645
Least Significant Difference    0.0109
Harmonic Mean of Cell Sizes          3

   NOTE: Cell sizes are not equal.

Means with the same letter are not significantly different.

  t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

          A      0.031836      4    2
          A      0.029266      4    1
          B      0.001281      2    0

                    The GLM Procedure

                  t Tests (LSD) for pH


Alpha                             0.05
Error Degrees of Freedom             4
Error Mean Square             0.115035
Critical Value of t            2.77645
Least Significant Difference    0.7689
Harmonic Mean of Cell Sizes          3

   NOTE: Cell sizes are not equal.

Means with the same letter are not significantly different.

  t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

          A        5.7384      2    0
          B        3.6652      4    1
          B        3.6278      4    2

                    The GLM Procedure

                t Tests (LSD) for AMILOSA

Alpha                             0.05
Error Degrees of Freedom             4
Error Mean Square             1.150236
Critical Value of t            2.77645
Least Significant Difference    2.4313
Harmonic Mean of Cell Sizes          3

   NOTE: Cell sizes are not equal.

Means with the same letter are not significantly different.

  t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

          A       23.7462      4    1
          B       19.0105      4    2
          B       16.6205      2    0

                    The GLM Procedure

                  t Tests (LSD) for IAA

¿                  Alpha                             0.05
```

```
          Error Degrees of Freedom            4
          Error Mean Square             1.704549
          Critical Value of t            2.77645
          Least Significant Difference    2.9597
          Harmonic Mean of Cell Sizes          3

             NOTE: Cell sizes are not equal.

 Means with the same letter are not significantly different.


     t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

              A         8.659      2    0
          B   A         5.719      4    1
          B             5.336      4    2

                    t Tests (LSD) for ISA

          Alpha                            0.05
          Error Degrees of Freedom            4
          Error Mean Square             4.33873
          Critical Value of t           2.77645
          Least Significant Difference    4.722
          Harmonic Mean of Cell Sizes          3

             NOTE: Cell sizes are not equal.

 Means with the same letter are not significantly different.

   t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

          A         5.246      4    2
          A         4.939      4    1
          A         2.924      2    0

                    The GLM Procedure

             t Tests (LSD) for PHINCHAMIENTO

          Alpha                            0.05
          Error Degrees of Freedom            4
          Error Mean Square             1.846692
          Critical Value of t            2.77645
          Least Significant Difference    3.0806
          Harmonic Mean of Cell Sizes          3

             NOTE: Cell sizes are not equal.

 Means with the same letter are not significantly different.

     t Grouping          Mean      N    TRATAMIENTO

              A         8.799      2    0
          B   A         5.869      4    1
          B             5.465      4    2

                    The GLM Procedure

                t Tests (LSD) for CAPEXP

          Alpha                            0.05
          Error Degrees of Freedom            4
          Error Mean Square             0.211838
          Critical Value of t            2.77645
```

Least Significant Difference 1.0434
Harmonic Mean of Cell Sizes 3

NOTE: Cell sizes are not equal.

Means with the same letter are not significantly different.

t Grouping	Mean	N	TRATAMIENTO
A	8.6214	4	2
A	7.9959	4	1
B	7.1125	2	0

The CORR Procedure

Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
AMILOSA	45	19.58759	3.02108	881.44163	14.68539	25.26923
ISA	45	5.47130	2.24362	246.20843	2.12003	10.03484
EXPANSION	45	7.66296	2.38974	344.83298	1.00000	11.20000

Coeficientes de correlación Pearson, N = 45
Prob > |r| suponiendo H0: Rho=0

	AMILOSA	ISA	EXPANSION
AMILOSA	1.00000	0.70329	-0.33480
		<.0001	0.0246
ISA	0.70329	1.00000	-0.10385
	<.0001		0.4972
EXPANSION	-0.33480	-0.10385	1.00000
	0.0246	0.4972	