



Artículo

Características de calidad y digestibilidad *in vitro* del almidón agrio de yuca (*Manihot esculenta*) producido en Costa Rica

Quality characteristics and *in vitro* digestibility of sour cassava (*Manihot esculenta*) starch produced in Costa Rica

Pedro Vargas Aguilar^{1*}, Yorleny Araya Quesada¹, Raquel López Marín¹, Ana Ruth Bonilla Leiva²

¹Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Escuela de Tecnología de Alimentos. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

²Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

*Autor para correspondencia: pedro.vargas@ucr.ac.cr

Aceptado 06-Marzo-2012

Resumen

Se evaluaron las características físicas, químicas y microbiológicas del almidón agrio de yuca producido a partir de las variedades de yuca 'Valencia' y 'Brasileña'. El almidón agrio se obtuvo luego de un proceso de fermentación natural por 30 días y una posterior deshidratación mediante dos métodos: exposición directa al sol y en un secador solar. El proceso de fermentación para los almidones de ambas variedades se caracterizó por un aumento de la acidez titulable. Las propiedades físicas y químicas del almidón agrio de las dos variedades secados bajo los dos métodos se compararon con el almidón nativo. Se obtuvo una capacidad de expansión mayor ($p < 0,05$) para el almidón agrio ($5,6 - 6,9 \text{ cm}^3/\text{g}$), en comparación con el almidón nativo ($2,2 - 3,0 \text{ cm}^3/\text{g}$). El contenido de amilosa fue de aproximadamente un 37 - 38 % sin presentar diferencia significativa entre los almidones ($p > 0,05$). Se observó una forma esférica y truncada, así como la presencia del *hilum* en los gránulos de todos los almidones estudiados, sin embargo, en los almidones agrios presentó una apariencia con perforaciones, hendiduras y fisuras. Con respecto al tamaño de los gránulos se obtuvo un intervalo de $12,8 - 14,0 \mu\text{m}$ para el almidón nativo, mientras que el almidón agrio presentó valores de $11,3 - 11,6 \mu\text{m}$. Se midió la

digestibilidad *in vitro* del producto horneado obtenido de la prueba de expansión del almidón agrio variedad ‘Valencia’ y deshidratado en secador solar, por considerarse el más factible de procesar industrialmente. Se obtuvo 44 g/100 g de almidón lentamente digerible.

Palabras claves: almidón agrio de yuca, amilosa, capacidad de expansión, digestibilidad *in vitro*, fermentación.

Abstract

Physical, chemical and microbiological characteristics of sour cassava starch produced from cassava varieties ‘Brazilian’ and ‘Valencia’ were evaluated. Sour starch was obtained after a process of natural fermentation for 30 days and subsequent dehydration by two methods: direct to the sun and a solar dryer. The fermentation process for both starch varieties was characterized by an increased acidity. Expansion capacity for sour starch (5.6 to 6.9 cm³/g) was higher than native starch (2.2 to 3.0 cm³/g). The amylose content was 37 - 38 % for all samples. There was a truncated spherical shape and the presence of the *hilum* in the granules of the all starches, however sour starch presented an appearance with holes, cracks and fissures. The size of the granules obtained for the native starch was in the range of 12.8 to 14.0 microns for the native starch, while the sour starch showed values of 11.3 to 11.6 microns. Finally, was measured the *in vitro* digestibility of sour starch cassava ‘Valencia’ dehydrated in solar dryer, resulting in 44 g/100 g slowly digestible starch.

Key words: amylose, expansion capacity, fermentation, *in vitro* digestibility, sour starch cassava.

INTRODUCCIÓN

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una raíz cultivada en muchas regiones del mundo y es una de las principales fuentes de carbohidratos en algunos países tropicales y subtropicales. En Latinoamérica, usualmente se consume como producto fresco o es procesada para obtener harina y almidón, los cuales se utilizan en la elaboración de diferentes productos cocidos (Parada *et al.*, 1996). En Costa Rica se estimó que la producción de yuca fue de alrededor de 77.239,0 toneladas para el año 2004, siendo el consumo nacional relativamente bajo. La gran parte de la yuca se exporta (76.622,0 t) en forma parafinada o congelada, por lo que se requiere de opciones de procesamiento para generar valor agregado (Quirós-Madrigal *et al.*, 2006).

Algunos países como Brasil y Colombia tienen como alternativa de procesamiento la

elaboración tradicional de un producto conocido como “polvilho azedo” o almidón agrio, el cual se utiliza como ingrediente principal en la preparación de productos de panadería como pan de yuca, pan de queso y “biscuits” (Santos *et al.*, 2011). El almidón agrio es un almidón modificado que se obtiene a partir de la fermentación ácido láctica natural, durante 20 a 30 días, del almidón nativo extraído de la yuca, seguido por un secado al sol (Cárdenas y de Buckle, 1980). Con este proceso se obtienen las propiedades funcionales específicas y características sensoriales del producto final, primordialmente, la capacidad de expansión durante el horneado, que no pueden ser obtenidas cuando el almidón agrio es reemplazado por un almidón de yuca natural sin fermentar (Marcon *et al.*, 2007).

Al considerar que los panes y “biscuits” son valorados y comercializados de acuerdo a su volumen, la propiedad de expansión se

convierte en uno de los parámetros más importantes en la evaluación de la calidad del almidón agrio (Marcon *et al.*, 2007). Varios autores establecen que la expansión de la masa durante el horneado resulta de la evaporación del agua y/o de la deserción de dióxido de carbono (CO₂) que se produce, lo cual actúa como fuerza motriz y, por otro lado, debido a la presencia de un material con superficie activa que retiene las burbujas de gas (Bertolini *et al.*, 2000; Mestres *et al.*, 2000). Esta superficie polimérica se forma luego del secado por la presencia de los ácidos orgánicos formados durante la fermentación, obteniéndose la presencia de dextrinas y grupos carbonilos, además de los grupos hidroxilos de las moléculas de amilosa y amilopectina (Marcon *et al.*, 2009).

Una de las características más importantes de los alimentos ricos en almidón es la digestibilidad *in vitro*, cuyos parámetros permiten establecer una relación estrecha con la respuesta glicémica en el metabolismo (Englyst y Englyst, 2005; Rosin *et al.*, 2002). Para el caso del almidón agrio no se han encontrado estudios sobre esta propiedad. La medición *in vitro* de las fracciones que componen el almidón agrio se realizó para conocer las diferentes fracciones presentes de almidón obtenidas por medio del análisis de digestibilidad *in vitro*. Se determinó la glucosa rápidamente liberada (GRDIS), la glucosa lentamente liberada (GLDIS), la glucosa total (GT), el almidón rápidamente digerible (ARDIG), el almidón lentamente digerible (ALDIG), el almidón total (AT) y el almidón resistente (AR), para así evaluar su factibilidad de uso en productos alimenticios funcionales para controlar y/o prevenir la obesidad y las enfermedades asociadas a ésta, así como para los individuos diabéticos.

En el presente estudio se realizó una comparación de las características de calidad del almidón agrio obtenido a partir de dos variedades de yuca producidas en Costa Rica y adicionalmente para el almidón agrio de la

variedad ‘Valencia’ se midió la digestibilidad *in vitro* del producto horneado que se obtuvo de la prueba de expansión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima y criterios de selección

Se utilizaron dos variedades de yuca (*Manihot esculenta*): la variedad ‘Valencia’, recolectada en la finca productiva de la empresa Cacaotera, Santa Clara, San Carlos; y la variedad ‘Brasileña’, recolectada de las parcelas experimentales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Sede San Carlos, en Costa Rica. Las muestras debían ser, yuca en buen estado, sin evidencia de deterioro por microorganismos, ni daño físico, o sea calidad comercial de exportación. Para ello no se consideró el tamaño ni la edad de la yuca como una característica de calidad de producto. Las raíces se cosecharon, lavaron y se trasladaron al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad de Costa Rica para su procesamiento como almidón.

Condiciones de procesamiento

Las raíces de yuca se lavaron con agua potable y se pelaron manualmente con cuchillo, luego se cortaron en trozos de 7 a 10 cm para facilitar la operación de rallado, que se llevó a cabo utilizando una máquina ralladora HOBART (Hobart Corporation, Troy, OH, USA) con malla de 0,0625 in, produciendo una masa de ralladura de yuca. La masa de yuca rallada se hizo pasar a través de un colador metálico con doble malla y refuerzo de acero inoxidable, acompañado de una tela tipo “manta”, separando los gránulos del almidón. Se lavó con agua y la lechada obtenida se dejó sedimentar por 8 - 12 h en un recipiente plástico que había sido desinfectado. Una vez finalizado el periodo de sedimentación, se eliminó el agua sobrenadante y la “mancha” de agua. Una tercera parte de la capa de almidón

sedimentado se colocó en bandejas de acero inoxidable y se secó en una estufa marca WTB Binder (BINDER GmbH, Tuttlingen, Alemania - WTB Binder Labortechnik GmbH, Tuttlingen, Alemania) a 50 °C por 8 - 12 h, obteniéndose el almidón nativo. El resto del almidón sedimentado se sometió al proceso de fermentación. La fermentación se realizó en recipientes plásticos o baldes de 20 litros de capacidad utilizados únicamente para este proceso. En cada uno se depositaron 10 kg de almidón húmedo y se les adicionó 3 litros de agua potable, para establecer un ambiente anaeróbico. La fermentación se realizó por 30 días a temperatura ambiental (28 ± 1 °C) y durante este periodo se midió la variación del pH y la acidez titulable de las muestras. Posterior a esta etapa siguió el secado, el cual se llevó a cabo por el método tradicional de exposición directa al sol en bandejas de acero inoxidable de 30x25x6 cm colocadas en un área expuesta a la intemperie hasta alcanzar una humedad final de 12 %. También se utilizó el secador solar directo de gabinete de circulación natural, del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Costa Rica, en el cual se colocaron muestras de 1 kg de almidón en bandejas de acero inoxidable de 30x25x6 cm. El tiempo de secado fue entre 8 y 12 horas de exposición, necesario para alcanzar un contenido final de humedad de 12 - 14 %.

Análisis químicos

Las mediciones del pH y la acidez titulable se tomaron en el líquido sobrenadante del medio de fermentación según los métodos de la AOAC (2005).

Análisis microbiológicos

Se realizó un recuento total de aerobios mesófilos (AOAC, 1998) y un recuento de bacterias ácido lácticas (APHA, 2001) en el líquido sobrenadante durante la fermentación. Al almidón fermentado antes y después de los

procesos de secado se le realizó recuento de aerobios mesófilos totales (AOAC, 1998) y de mohos y levaduras (AOAC, 1998). A las muestras de almidón agrio deshidratado se les realizó un análisis de presencia de *E. coli* (AOAC, 1998). Todos los análisis se hicieron por triplicado.

Capacidad de expansión

La capacidad o potencial de expansión del almidón se determinó por medio del método descrito por Aplevicz y Demiate (2007). Se preparó una masa con 12 g de almidón agrio y aproximadamente 10 mL de agua hirviendo, la cual se horneó en un horno para pan, marca Dobra, modelo FR-4 (Dobra Industrial, S. A., Vilassar de Dalt, Barcelona, España) a 200 °C por 25 minutos. A este producto horneado se le midió la masa y el volumen siguiendo la descripción A-A-20126F de la USDA (2008). El resultado se expresó como volumen específico (cm^3/g) calculando la relación del volumen obtenido y la masa del producto horneado (Maeda y Cereda, 2001).

Contenido de amilosa

Para los almidones obtenidos se determinó la concentración de amilosa por el método colorimétrico "Blue Value" propuesto por Radley (1976) y se utilizó una curva de calibración con un patrón de amilosa pura Sigma A0512 (Sigma-Aldrich®, Corp., Saint Louis, MO, USA).

Análisis microscópico

Para la caracterización microscópica de los gránulos de almidón se colocó una pequeña porción de almidón sobre un portaobjetos y se agregó una gota de una solución de yodo/yoduro de potasio al 0,2 % (Ceballos *et al.*, 2008). Las muestras se observaron en un microscopio de luz invertido OLYMPUS®,

modelo IX51® (Olympus America, Inc., Melville, NY, USA) y las imágenes se captaron utilizando aumento a 100X. Para determinar el tamaño los gránulos se utilizó el software UTHSCSA Image Tool, versión 3.0 (University of Texas Health Science Center at San Antonio, USA). En los gránulos equiaxiales el tamaño corresponde al diámetro y en los no equiaxiales el tamaño corresponde a la distancia más larga entre fronteras de gránulo (Medina y Salas, 2008).

Digestibilidad *in vitro*

La determinación de los parámetros indicadores de la digestibilidad *in vitro* del almidón se llevó a cabo según el método enzimático descrito por Englyst *et al.* (2000), el cual consiste en la cuantificación de las diferentes fracciones del almidón mediante la hidrólisis enzimática y la medición de la glucosa liberada. Las muestras que se analizaron fueron el producto horneado obtenido de la prueba de expansión, las cuales fueron tratadas con proteasas para eliminar cualquier interacción del almidón con proteínas. Se realizó una incubación con enzimas amilolíticas bajo condiciones controladas y establecidas de temperatura, pH, viscosidad y velocidad de agitación. A los 20 y 120 minutos se tomaron submuestras y se determinó la glucosa (G20 y G120), las cuales representaron la glucosa rápidamente liberada (GRDIS) y la glucosa lentamente liberada (GLDIS), respectivamente. Cualquier resto de almidón fue dispersado antes de la hidrólisis enzimática para obtener el valor de la glucosa total (GT). Luego se determinó el almidón rápidamente digerible (ARDIG), el almidón lentamente digerible (ALDIG) y el almidón total (AT), multiplicando las fracciones de glucosa por el factor 0,9. El almidón resistente (AR) se obtuvo de la diferencia entre G120 y GT.

Análisis de datos

Para cada variedad, se construyó un gráfico que representó el comportamiento de los parámetros medidos a lo largo del periodo de fermentación. Para analizar la calidad microbiológica del almidón se determinó la reducción logarítmica en la carga aerobia mesófila total y la carga de mohos y levaduras que se obtuvo con la operación de secado. Para determinar si el efecto de la variedad y del tipo de secado sobre la reducción de la carga microbiana era significativo se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) sobre el diseño factorial. Con el fin de comparar los almidones fermentado y nativo, para las variables respuesta capacidad de expansión, contenido de amilosa y diámetro de gránulo de almidón se aplicó un ANDEVA, y en el caso de detectar diferencias significativas ($p < 0,05$) se hizo la prueba de comparación de medias Tukey. El software estadístico utilizado fue JMP®, versión 8.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del proceso de fermentación

En la fermentación se observó la formación de burbujas de gas en la masa de almidón, espumas en la superficie del agua sobrenadante, descenso del valor de pH y aumento de la acidez titulable del líquido sobrenadante. Condiciones que a criterio de González-Ríos y Arévalo del Águila (2001) caracterizan la fase principal del proceso de fermentación.

En la Fig. 1 se pueden apreciar tres etapas en el comportamiento del pH, acidez titulable, recuento total de aerobios mesófilos y recuento de bacterias ácido lácticas (BAL) para ambas variedades, las cuales se encuentran demarcadas en el gráfico como etapa 1, etapa 2 y etapa 3.

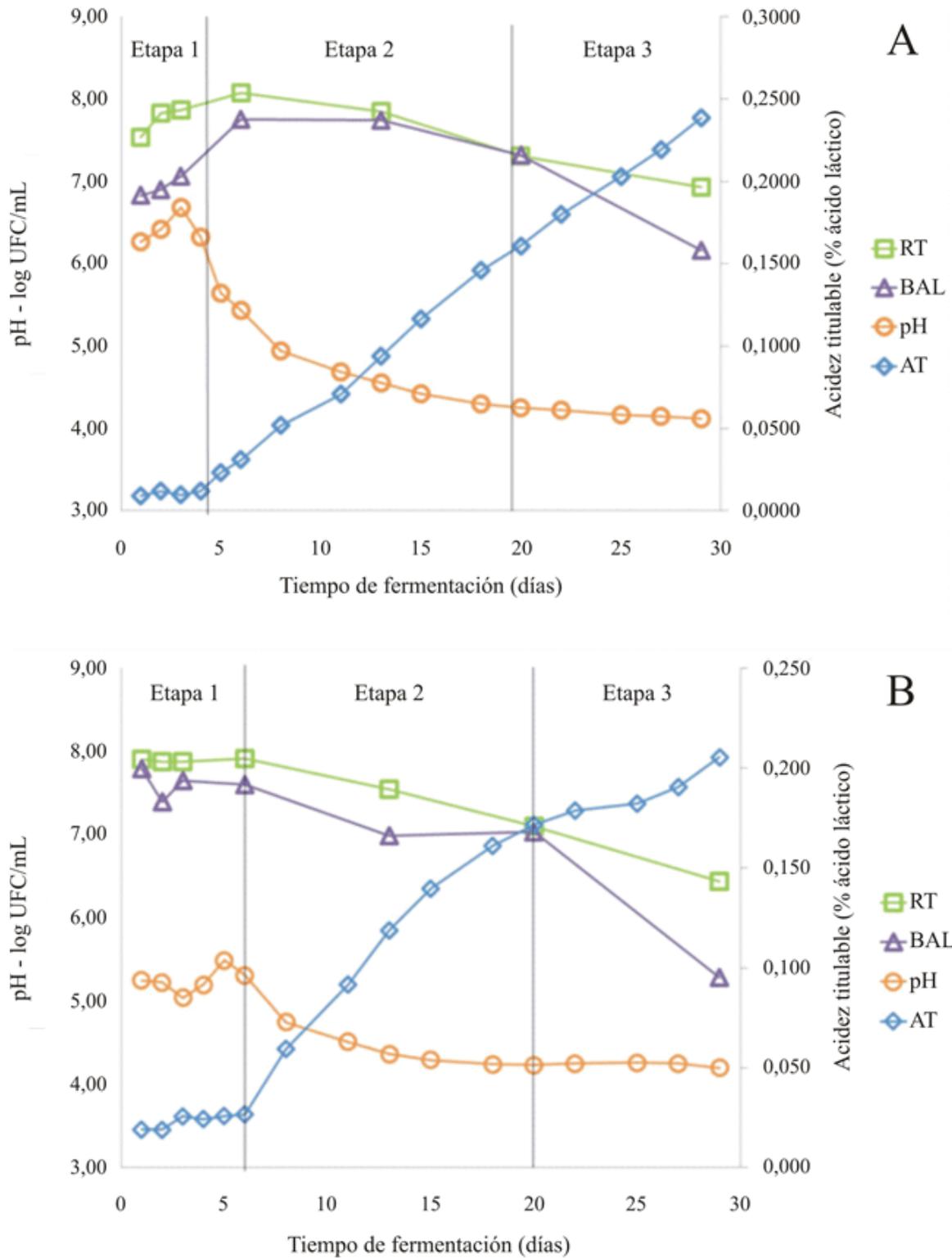


Figura 1.- Variaciones en el pH, acidez titulable (AT), carga aerobia mesófila (RT) y carga de bacterias ácido lácticas (BAL) durante la fermentación de almidón de yuca variedad 'Valencia' (A) y 'Brasileña' (B).

En la etapa 1 el pH y la acidez titulable se mantuvieron relativamente estables para ambas variedades, mientras que la carga microbiana total y BAL aumentaron en la variedad ‘Valencia’ y se mantuvieron estables en la variedad ‘Brasileña’. Este comportamiento se debe a que durante la primera etapa de la fermentación ocurre la acción enzimática de los microorganismos amilolíticos sobre el almidón produciendo azúcares fermentables para su propia asimilación y para las BAL (Marcon *et al.*, 2006; Avancini *et al.*, 2007). A pesar de ser cosechadas durante la misma época, en el caso de la variedad ‘Brasileña’ la carga microbiana total y de BAL fue inicialmente más alta (7,5 - 8 UFC/mL) y el pH fue menor ($\approx 5,0$), en comparación con la variedad ‘Valencia’.

La segunda etapa de la fermentación (etapa 2) se caracterizó por el descenso del pH y el aumento de la acidez titulable para ambas variedades; la carga microbiana total y láctica empezaron a disminuir para las dos variedades. En esta fase, las BAL utilizan los azúcares fermentables para la producción de ácidos orgánicos, compuestos aromáticos y vitaminas, entre otras sustancias (Oyewole, 2001; Avancini *et al.*, 2007). Además, esta producción de ácidos orgánicos y compuestos aromáticos corresponde al descenso del pH y aumento de la acidez durante este periodo (Marcon *et al.*, 2007).

En la etapa 3 (final), se observó la disminución de la carga microbiana, principalmente las BAL, así como la estabilización del pH. Estos resultados concuerdan con el estudio realizado en dos pequeñas rallerías del área rural cercana a Cali, en Colombia, en el cual se encontró que en la etapa final de la fermentación el número de UFC/g disminuía y el pH se estabilizaba a un valor de 4,0 (Parada *et al.*, 1996). En el caso de la variedad ‘Valencia’ la carga final de BAL fue aproximadamente un logaritmo mayor a la de la variedad ‘Brasileña’ y alcanzó una mayor

acidez total (0,24 % expresado como g ácido láctico/100 g).

Calidad microbiológica del almidón agrio

El efecto del método de deshidratación del almidón sobre la reducción de la carga microbiológica (recuento total y recuento de mohos y levaduras), medida como la diferencia entre la carga inicial y final del proceso de secado se presenta en el Cuadro 1.

Al comparar entre variedades, se puede observar que la reducción de la carga aerobia mesófila de la variedad ‘Valencia’ fue mayor (≈ 5 log) que en la variedad Brasileña (≈ 2 log) ($p < 0,05$), mientras que la reducción del recuento de mohos y levaduras fue similar para las dos variedades. En el caso del tipo de secado, la mayor diferencia se observó para el recuento de mohos y levaduras, donde con el secador solar se redujo carga en aproximadamente 1 log más que en el secado por exposición directa ($p < 0,05$).

Es importante mencionar que el recuento de mohos y levaduras en el producto final deshidratado en secador solar fue menor al límite máximo establecido por el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA) para harinas (RTCA, 2007), el cual es de 10^3 UFC/g, mientras que los valores obtenidos para el almidón agrio secado por exposición directa estuvieron más cercanos a este límite. Además, la carga de aerobios mesófilos en los almidones agrios deshidratados fue de entre 10^2 y 10^5 UFC/g.

Adicionalmente, se realizó un análisis de *E. coli* para las muestras de almidón agrio deshidratado, en el cual se obtuvo un recuento $< 3,0$ NMP/g para los dos tipos de secado, éste valor coincide con el límite máximo permitido y establecido para los derivados de raíces y tubérculos en el RTCA de criterios microbiológicos para la inocuidad de alimentos (RTCA, 2009). Valores bajos de pH y altos de acidez en el almidón agrio son factores que inhiben el crecimiento de este microorganismo (Cadena *et al.*, 2006).

Cuadro 1.- Reducción logarítmica de la carga microbiana del almidón agrio según la variedad de yuca y el tipo de secado.

Variedad	Tipo de secado	Reducción log*	
		Recuento total	Recuento mohos y levaduras
Valencia	Secador solar	5,63 ^a	3,98 ^a
	Directo	5,06 ^a	2,95 ^b
Brasileña	Secador solar	2,72 ^b	4,64 ^a
	Directo	2,44 ^b	3,65 ^b

* Promedios con letra diferente (en superíndices) en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Capacidad de expansión

En el Cuadro 2 se puede observar que los almidones nativos obtuvieron los menores índices de expansión ($2 - 3 \text{ cm}^3/\text{g}$) sin presentar diferencias significativas ($p > 0,05$) entre variedades, estos valores son similares a los obtenidos por Aplevicz y Demiate (2007) y Marcon *et al.* (2009) para las muestras de almidón nativo ($3,9 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $2,9 \text{ cm}^3/\text{g}$, respectivamente). Por otro lado, en las muestras de almidón fermentado se obtuvieron valores de expansión entre $5,6 - 6,9 \text{ cm}^3/\text{g}$, siendo estos dos valores extremos los únicos que presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), los cuales corresponden al almidón agrio de la variedad ‘Brasileña’ y al almidón agrio de la variedad ‘Valencia’ ambos secados por exposición directa (AAEDB y AAEDV, respectivamente). Estos valores de expansión concuerdan con el valor indicado por Marcon *et al.* (2009) de $5,74 \text{ cm}^3/\text{g}$ para el almidón agrio secado al sol. Sin embargo, para el “polvilho azedo” comercial otros autores presentan valores más altos en intervalos de $7,4$ y $14,1 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Maeda y Cereda, 2001; Aplevicz y Demiate, 2007).

Contenido de amilosa

Para todos los tratamientos se obtuvo un contenido de amilosa entre $37 - 38 \%$ (Cuadro

2), valores similares al encontrado por Mestres y Rouau (1997) de 34% y por Putri *et al.* (2011) de $33,21 \%$ para el contenido de amilosa del almidón nativo de yuca. No se encontraron diferencias significativas entre las muestras de almidón nativo y almidón fermentado ($p > 0,05$) para el contenido de amilosa.

Tamaño granular

El tamaño promedio de los gránulos de almidón de yuca fue de $11,3 \mu\text{m}$ (AAEDB) a $14,0 \mu\text{m}$ (ANV) (Cuadro 2), los cuales se encuentran dentro del intervalo del tamaño granular del almidón de yuca ($5 - 40 \mu\text{m}$) (Moorthy, 2004). Se puede observar que no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los diámetros del almidón obtenidos con los dos tipos de secado y las variedades de yuca estudiadas. No obstante, se obtuvo una reducción significativa ($p < 0,05$) del tamaño del gránulo con el proceso de fermentación para el almidón de la variedad ‘Valencia’ (de $14,0 \mu\text{m}$ a $11,3$ y $11,6 \mu\text{m}$); lo mismo se observó entre el ANB y AAEDB. Las variaciones encontradas en estos resultados se deben tanto al origen del almidón y su variabilidad natural como al tiempo de fermentación; ambos factores afectan la microestructura del gránulo (Marcon *et al.*, 2006).

Cuadro 2.- Características físicas y químicas de los almidones nativos y fermentados secados mediante dos tipos de secado.*

Tratamiento	Capacidad de expansión (cm ³ /g)	Contenido de amilosa (%)	Diámetro del gránulo (µm)	Forma del gránulo
Almidón Nativo				
Valencia (ANV)	3,0 ± 0,9 ^c	38,1 ± 0,9 ^a	14,0 ± 0,8 ^a	Redonda, truncada
Brasileña (ANB)	2,2 ± 0,7 ^c	37,0 ± 1,0 ^a	12,8 ± 0,6 ^{a,b}	Redonda, truncada
Almidón Agrio secado Exposición Directa				
Valencia (AAEDV)	6,9 ± 0,4 ^a	37,5 ± 0,4 ^a	11,3 ± 0,8 ^c	Redonda, truncada
Brasileña (AAEDB)	5,6 ± 0,6 ^b	37,4 ± 0,6 ^a	11,3 ± 0,6 ^c	Redonda, truncada
Almidón Agrio secado Secador Solar				
Valencia (AASSV)	6,0 ± 0,6 ^{a,b}	37,0 ± 2,0 ^a	11,6 ± 0,8 ^{b,c}	Redonda, truncada
Brasileña (AASSB)	5,9 ± 0,6 ^{a,b}	38,0 ± 0,7 ^a	11,4 ± 0,7 ^{b,c}	Redonda, truncada

* promedios con letra diferente (en superíndices) en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Análisis microscópico

En la Fig. 2 se pueden apreciar los gránulos de almidón de yuca vistos a través del microscopio de luz, los cuales presentaron una forma redonda y/o esférica, truncada en uno de sus extremos y presentan un *hilum* o cruz de malta bien definido en el centro. Estas observaciones concuerdan con lo documentado por una gran cantidad de autores, quienes han identificado las principales características de los gránulos de almidón de varias fuentes botánicas, incluido el almidón de yuca (Radley, 1976; Flint, 1994; Niba *et al.*, 2002; Moorthy, 2004; Onitilo *et al.*, 2007; Alvis *et al.*, 2008; Hernández-Medina *et al.*, 2008; Medina y Salas, 2008).

Principalmente, las diferencias se presentaron en la apariencia de los gránulos, en el almidón nativo se observó lisa y homogénea, mientras que en el almidón fermentado se

observaron rugosidades, hendiduras, fisuras y cortes. Estas observaciones evidencian el ataque llevado a cabo por las enzimas microbianas sobre los gránulos durante la etapa de fermentación del almidón de yuca (Cárdenas y Buckle, 1980; González-Ríos y Arévalo del Águila, 2001; Marcon *et al.*, 2006; Onitilo *et al.*, 2007; Julianti *et al.*, 2011), además de la modificación ácida que ocurre por la producción de ácidos orgánicos, principalmente el ácido láctico. En un estudio realizado en Indonesia, se encontró que la estructura de los gránulos antes y después de una fermentación es diferente y que el grado de porosidad influencia de manera significativa la reactividad química del mismo, y que por la despolimerización sufrida, efecto de las enzimas y del ácido láctico, ocurre una reducción del tamaño de la partícula que podría ser responsable de la capacidad de expansión del almidón (Putri *et al.*, 2011).

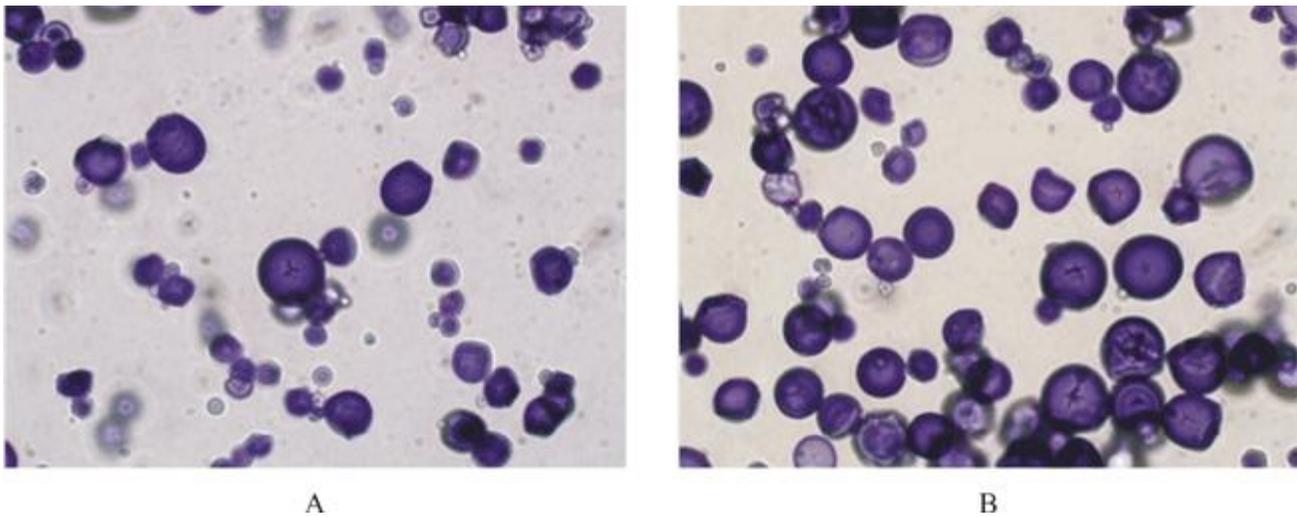


Figura 2.- Microfotografías de los almidones de yuca a 100X. Almidón nativo 'Valencia' (A). Almidón agrio 'Valencia' utilizando secador solar (B).

Digestibilidad *in vitro*

El Cuadro 3 muestra que el producto horneado hecho con almidón agrio de yuca variedad 'Valencia' tuvo una concentración de AT de 77 g/100 g. También aparecen en este cuadro las diferentes fracciones presentes de almidón obtenidas por medio del análisis de digestibilidad *in vitro*. Como puede observarse todo el almidón presente es digerible, ya que no se detectó AR. La fracción de ARDIG para el producto con almidón agrio fue de 34 g/100 g y el indicado para el pan blanco es de 37,4 g/100 g. La fracción de ALDIG para el almidón agrio fue de 44 g/100 g, mientras que para pan blanco es de 3,7 g/100 g. A pesar de la concentración alta de ARDIG el producto presentó una

proporción mayor de ALDIG que la tabulada para pan blanco (Englyst *et al.*, 1996; Englyst *et al.*, 2000). Algunos de los factores que pudieron influir en la digestión más lenta del almidón agrio es la presencia de ácidos orgánicos producidos en la fermentación, los cuales pueden reducir la tasa de digestión del almidón (Björck *et al.*, 1994), y por otro lado la formación de estructuras secundarias por parte de la amilosa que luego del procesamiento son difíciles de dispersar (Englyst y Englyst, 2005). Con el fin de evaluar con mayor profundidad este aspecto es necesario llevar a cabo estudios *in vivo* para determinar la respuesta glicémica después de consumir productos horneados a base de almidón agrio.

Cuadro 3.- Fracciones de almidón del producto horneado obtenido en la prueba de expansión del almidón agrio variedad 'Valencia' secado en secador solar.

Tratamiento	Fracciones de almidón (g/100 g)			
	ARDIG	ALDIG	AR	AT
AASSV	34 ± 2	44 ± 4	0	77 ± 2

AASSV: almidón agrio variedad 'Valencia' secado en secador solar. ARDIG: almidón rápidamente digerible. ALDIG: almidón lentamente digerible. AR: almidón resistente. AT: almidón total.

CONCLUSIONES

El almidón agrio obtenido a partir de las variedades de yuca ‘Valencia’ y ‘Brasileña’ presentó capacidad de expansión durante el horneado. Esta propiedad no fue afectada por el método de secado para una misma variedad indicando que es factible utilizar un secador solar para su deshidratación, con el fin de tener un mayor control sobre esta etapa. El producto horneado obtenido con el almidón tiene una mayor cantidad de almidón lentamente digerible con respecto al pan blanco.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvis, Armando; Vélez, Carlos A.; Villada, Héctor S. y Rada-Mendoza, Maite. 2008. Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas. *Información Tecnológica*. 19(1):19-28.
- AOAC. 1998. Association of Official Analytical Chemist. Official Methods of Analysis. (16ta. ed.). Washington, USA.
- AOAC. 2005. Association of Official Analytical Chemist. Official Methods of Analysis. (18va. ed.). Washington, USA.
- APHA. 2001. American Public Health Association. Compendium of methods for the microbiological examination of foods. (4th. ed.). Washington D. C., USA.
- Aplevicz, Krischina Singer e Demiate, Ivo Mottin. 2007. Caracterização de amidos de mandioca nativos e modificados e utilização em produtos panificados. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 27(3):478-484.
- Avancini, S.R.P.; Faccin, G.L.; Vieira, M.A.; Rovaris, A.A.; Podestá, R.; Tramonte, R.; de Souza, N.M.A. and Amante, E.R. 2007. Cassava starch fermentation wastewater: characterization and preliminary toxicological studies. *Food and Chemical Toxicology*. 45(11):2273-2278.
- Bertolini, Andréa C.; Mestres, Christian and Colonna, Paul. 2000. Rheological properties of acidified and UV-irradiated starches. *Starch/Stärke*. 52(10):340-344.
- Björck, Inger; Granfeldt, Yvonne; Liljeberg, Helena; Tovar, Juscelino and Asp, Nils Georg. 1994. Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 59(Suppl.):699S-705S.
- Cadena, Marly P.; Villarraga, Erika C.; Luján, Deivis E. y Salcedo, Jairo G. 2006. Evaluación de la agroindustria del almidón agrio de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en Córdoba y Sucre. *Temas Agrarios*. 11(1):43-53.
- Cárdenas, O.S. and de Buckle, T.S. 1980. Sour cassava starch production: a preliminary study. *Journal of Food Science*. 45(6):1509-1512.
- Ceballos, Hernán; Sánchez, Teresa; Denyer, Kay; Tofiño, Adriana P.; Rosero, Elvia A.; Dufour, Dominique; Smith, Alison; Morante, Nelson; Pérez, Juan C. and Fahy, Brendan. 2008. Induction and identification of a small-granule, high-amylose mutant in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(16): 7215-7222.
- Englyst, Hans N.; Veenstra, Jan and Hudson, Geoffrey J. 1996. Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: a potencial *in vitro* predictor of the glycaemic response. *British Journal of Nutrition*. 75(3):327-337.
- Englyst, Klaus N.; Hudson, Geoffrey J. and Englyst, Hans N. 2000. Starch analysis in food. In *Encyclopedia of analytical chemistry. Applications, theory and instrumentation*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Englyst, Klaus N. and Englyst, Hans N. 2005. Carbohydrate bioavailability. *British Journal of Nutrition* 94(1):1-11.
- Flint, Olga. 1994. Microscopía de los alimentos: manual de métodos prácticos

- utilizando la microscopía óptica. Zaragoza: Editorial Acribia, S. A.
- González-Ríos, Littman. y Arévalo del Águila, Segundo. 2001. Fabricación del polvillo ácido a partir del almidón de yuca. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria* 1(1):49-53.
- Hernández-Medina, Marilyn; Torruco-Uco, Juan Gabriel; Chel-Guerrero, Luis y Betancour-Ancona, David. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 28(3):718-726.
- Julianti, Elisa; Lubis, Zulkifli; Ridwansyah; Yusraini, Era and Suhaidi, Ismed. 2011. Physicochemical and functional properties of fermented starch from four cassava varieties. *Asian Journal of Agricultural Research*. 5(6):292-299.
- Maeda, Kelly C. e Cereda, Marney P. 2001. Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 21(2):139-143.
- Marcon, M.J.A.; Vieira, M.A.; Santos, K.; De Simas, K.N.; Amboni, R. Dias de Mello Castanho and Amante, E.R. 2006. The effect of fermentation on cassava starch microstructure. *Journal of Food Process Engineering*. 29(4):362-372.
- Marcon, Maria Janete Angeloni; Kurtz, Diego Jacob; Raguzzoni, Josiane Callegaro; Delgadillo, Ivonne; Maraschin, Marcelo; Soldi, Valdir; Reginatto, Valéria and Amante, Edna Regina. 2009. Expansion properties of sour cassava starch (polvilho azedo): variables related to its practical application in bakery. *Starch/Stärke*. 61(12):716-716.
- Marcon, Maria Janete Angeloni; Vieira, Gisele Cristina Netto; de Simas, Karina Nunes; Santos, Karina; Vieira, Manoela Alano; Amboni, Renata Dias de Mello Castanho and Amante, Edna Regina. 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.
- Medina, Jorge Alberto y Salas, Juan Camilo. 2008. Caracterización morfológica del grano de almidón nativo: apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de Ingeniería (Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia)*. 27:56-62.
- Mestres, Christian and Rouau, Xavier. 1997. Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 74(2):147-155.
- Mestres, Christian; Bounou, Oreste; Akissoë, N. and Zakhia, Nadine. 2000. Comparison of the expansion ability of fermented maize flour and cassava starch during baking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80(6):665-672.
- Moorthy, S.N. 2004. Tropical sources of starch. In *Starch in food: structure, function and applications*. (pp. 321-359). Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC – Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Niba, L.L.; Bokanga, M.M.; Jackson, F.L.; Schlimme, D.S. and Li, B.W. 2002. Physicochemical properties and starch granular characteristics of flour from various *Manihot esculenta* (Cassava) genotypes. *Journal of Food Science*. 67(5):1701-1705.
- Onitilo, M.O.; Sanni, L.O.; Oyewole, O.B. and Maziya-Dixon, B. 2007. Physicochemical and functional properties of sour starches from different cassava varieties. *International Journal of Food Properties*. 10(3):607-620.
- Oyewole, O.B. 2001. Characteristics and significance of yeasts' involvement in cassava fermentation for 'fufu' production. *International Journal of Food Microbiology*. 65(3):213-218.

- Parada, J.L.; Zapata, E.; de Fabrizio, S.V. and Martinez, A. 1996. Microbiological and technological aspects of cassava-starch fermentation. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 12(1):53-56.
- Putri, W.D.R.; Haryadi, D.W.; Marseno and Cahyanto, M.N. 2011. Effect of biodegradation by lactic acid bacteria on physical properties of cassava starch. *International Food Research Journal*. 18(3):1149-1154.
- Quirós-Madrigal, Olman; Jiménez-Alfaro, Alberto y Monge-Monge, Yeudy. 2006. Proyecto: Elaboración del mapa y el análisis de la agrocadena de raíces y tubérculos con tres productos (yuca, ñame y yampí) en el área de los cantones de Pococí y Guácimo, Limón y propuestas de innovación. Informe final. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), San José, Costa Rica.
- Radley, J.A. 1976. Examination and analysis of starch and starch products. London: Applied Science Publishers, Ltd.
- Rosin, Patricia M.; Lajolo, Franco M. and Menezes, Elizabete W. 2002. Measurement and characterization of dietary starches. *Journal of Food Composition and Analysis*. 15(4):367-377.
- Santos, Aline Alves Oliveira; e Silva, Izabel Veras Cristina; dos Santos, João Paulo Almeida; Santana, Danielle Gomes; Almeida, Meirielly Lima e Marcellini, Paulo Sergio. 2011. Elaboração de biscoitos de chocolate com substituição parcial da farinha de trigo por polvilho azedo e farinha de albedo de laranja. *Ciência Rural*. 41(3):531-536.
- RTCA. 2007. Reglamento Técnico Centroamericano. Harinas. Harina de trigo fortificada. Especificaciones. RTCA 67.01.15:07.
- RTCA. 2009. Reglamento Técnico Centroamericano. Alimentos. Criterios microbiológicos para la inocuidad de alimentos. RTCA 67.04.50:08.
- USDA. 2008. United States Department of Agriculture. Commercial item description flour. A-A-20126F. <http://www.ams.usda.gov/AMSV1.0/getfile?dDocName=STELDEV3006569>