

COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE HARINAS Y ALMIDONES DE YUCA (*Manihot esculenta* CRANTZ) DURANTE UN PROCESO DE EXTRUSIÓN

RHEOLOGICAL MODELING OF CASSAVA (*Manihot esculenta* CRANZ) STARCHES AND FLOURS DURING EXTRUSION PROCESS

Angélica P. SANDOVAL A.^{1*}, Imad FARHAT² y Alejandro FERNÁNDEZ Q.¹

Recibido: Octubre 17 de 2006 Aceptado: Mayo 15 de 2007

RESUMEN

La obtención de modelos reológicos para almidones y harinas de yuca durante un proceso de extrusión se realizó con el fin de predecir los efectos de la velocidad de corte, la temperatura y el contenido de agua en la viscosidad de la masa fundida. La experimentación se llevó a cabo en un reómetro capilar de alta presión (Rosand RH-7) de doble boquilla y los datos de viscosidad obtenidos se ajustaron al modelo reológico de Harper. Todos los materiales presentaron un comportamiento característico de disminución de la viscosidad al aumentar la velocidad de corte. La viscosidad de los almidones fue más sensible a las modificaciones en las condiciones de proceso, como el cambio de temperatura y contenido de agua; por otra parte, la presencia de otros componentes, como fibra y proteína tuvo una alta influencia en la viscosidad de las harinas, lo que se explica por la interferencia de estos compuestos en el proceso de gelatinización del almidón.

Palabras clave: Comportamiento reológico, viscosidad por fricción, extrusión, yuca, harina, almidón.

ABSTRACT

Rheological modeling of cassava flours and starches during an extrusion process was made in order to predict the effect of shear rate, temperature and water contents on viscosity. Experimentation was made on a high pressure twin bore capillary rheometer (Rosand RH-7) and viscosity data were adjusted to the Harper rheological model. All materials presented a characteristic shear thinning behaviour, but starch viscosity was more sensitive to changes of the processing conditions such as temperature and water contents, whereas flour viscosity was influenced by fiber and protein which interfered with starch gelatinization.

Keywords: Rheological modeling, shear viscosity, extrusion, yucca, flour, starch.

1 Departamento de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Calle 13 No 100-00. Cali, Colombia.

2 Food Sciences Division, School of Biological Sciences, University of Nottingham. Nottingham, Reino Unido.

* Autor a quien se debe dirigir la correspondencia: angelsan@univalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de extrusión en la industria de alimentos, el almidón sufre cambios estructurales como resultado de los procesos de gelatinización, fusión y fragmentación (1). Estos cambios en el gránulo de almidón afectan significativamente la viscosidad de la masa fundida (2). Es importante conocer la relación entre los cambios estructurales en el almidón y las propiedades reológicas de la masa que se forma durante el proceso de extrusión, pues el comportamiento reológico está relacionado con la expansión del extruido y la textura final. Las propiedades reológicas, en consecuencia, son una característica esencial ligada a la calidad del producto y una medida directa del grado de procesamiento del almidón (3).

Con los avances en la ciencia de la extrusión se ha vuelto evidente la necesidad de datos reológicos para establecer condiciones de procesamiento y control, especialmente para determinar la sensibilidad del material a los cambios en el contenido de agua, temperatura, fricción, variación de la materia prima y dimensiones de la boquilla; igualmente para el modelamiento y diseño del proceso de extrusión (4).

Las técnicas de medición del comportamiento reológico se pueden dividir en dos categorías básicas, medidas fuera de línea del proceso en instrumentos como reómetros capilares o rotacionales, o medidas en línea con la producción, utilizando reómetros acoplados a la salida del extrusor. Una de las principales ventajas de la medida fuera de línea es la posibilidad de trabajar en condiciones experimentales estrictamente controladas en reómetros de alta sensibilidad; sin embargo, estas mediciones se realizan a mayores contenidos de agua, por lo que la viscosidad determinada es menor a la desarrollada directamente en un extrusor. El reómetro capilar es el instrumento más utilizado para determinar las propiedades reológicas de materiales alimenticios extruidos; en este equipo el material que se va a estudiar, se obliga a fluir a través de una boquilla capilar utilizando un émbolo o pistón para producir presión (5).

El primer modelo reológico para explicar el comportamiento de las masas de cereales fundidas por extrusión fue el de Harper (6), el cual asume que la masa se comporta como un fluido pseudoplástico, de acuerdo al modelo de ley de potencia, con dependencia al cambio de la temperatura del tipo Arrhenius y una sensibilidad exponencial al cambio en el contenido de agua. A partir de este modelo se

han venido incorporando términos, con el fin de considerar el grado de conversión del almidón, la fragmentación macromolecular, la energía mecánica específica, entre otros (2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12). En el caso de raíces y tubérculos son muy pocas las investigaciones sobre modelos reológicos que se han centrado únicamente en papa (13, 14, 15).

El principal componente de la raíz de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es el almidón, el cual se utiliza como ingrediente en las industrias de extrusión para el desarrollo de productos expandidos en países como Tailandia y Brasil, entre otros, donde el almidón y la harina de yuca tienen alta disponibilidad (16). Sin embargo, se ha observado que las raíces de yuca, sembradas a diferentes condiciones ambientales, producen almidones con propiedades funcionales diferentes, lo cual se ha relacionado con la estructura molecular y la arquitectura del gránulo de almidón (17). Por otra parte, la harina de yuca generalmente se procesa a partir de la raíz entera, la cual se taja, se seca y posteriormente se muele y tamiza hasta obtener un tamaño de partícula apropiado (18). Sin embargo la fibra de yuca, el subproducto grueso de la extracción industrial de almidón, actualmente se seca y se vende como harina (19). Las propiedades funcionales del almidón y la harina son importantes puesto que influyen ampliamente en las características de nuevos productos alimenticios.

El objetivo de este trabajo fue obtener modelos reológicos para productos derivados de la yuca sometidos a un tratamiento de extrusión. Los productos estudiados fueron dos almidones y dos harinas de yuca, obtenidos de raíces sembradas a condiciones ambientales específicas, utilizando diferentes procesos de manufactura.

Consideraciones teóricas

Los datos reológicos se obtuvieron en un reómetro capilar de alta presión, de donde se determina la caída de presión en el capilar y la velocidad de flujo volumétrico. Para determinar la viscosidad de un material que fluye en un capilar se debe calcular el esfuerzo de corte y la velocidad de corte a la pared (5, 20, 21, 22).

$$\tau_w = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \left(\frac{r}{2} \right) \quad (1)$$

donde: τ_w es el esfuerzo de corte a la pared (Pa), ΔP es la caída de presión (Pa), L es la longitud del

capilar (mm), $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ es el gradiente de presión y r es el radio del capilar (mm).

La velocidad de corte aparente se calcula con la Ecuación (2), la cual depende del flujo volumétrico y el radio del capilar empleado.

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{4Q}{\pi r^3} \quad (2)$$

donde, $\dot{\gamma}_{ap}$ es la velocidad de corte aparente (s^{-1}) y Q es el flujo volumétrico ($mm^3 s^{-1}$)

La velocidad de corte a la pared se determina con la Ecuación 3, la cual incluye la corrección por el índice de comportamiento de flujo necesario para fluidos no-newtonianos. Este ajuste se conoce como la corrección de Rabinowitsh (22).

$$\dot{\gamma}_w = \frac{(3n+1)\dot{\gamma}_{ap}}{4n} \quad (3)$$

donde: $\dot{\gamma}_w$ es la velocidad de corte a la pared (s^{-1}) y n es el índice de comportamiento de flujo que se obtiene de la pendiente de la gráfica de caída de presión en función de la velocidad de corte aparente

La viscosidad de fricción aparente (η) del material estudiado se calcula con la Ecuación (4).

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (4)$$

Los valores experimentales obtenidos se ajustan al modelo reológico de regresión de Harper, el cual se muestra en la ecuación (5).

$$\eta = K_0 \dot{\gamma}^{n-1} \exp\left[\frac{\Delta E}{R} \left(\frac{1}{T}\right) + b(MC)\right] \quad (5)$$

donde η es la viscosidad aparente (Pas), K_0 es el índice de consistencia (Pasⁿ), n es el índice de comportamiento de flujo, $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte (s^{-1}), ΔE es la energía de activación (J/mol), R es la constante gases ideales (J/ mol K), T es la temperatura (K), MC es la fracción másica de agua (b.h) y el parámetro b que lo acompaña indica el efecto del cambio en el contenido de humedad en la viscosidad del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Las raíces de yuca utilizadas en este estudio fueron cultivadas en dos zonas geográficas diferentes

en Colombia. La zona geográfica A se encuentra localizada en el Valle del Cauca, a 1.000 msnm y presenta una temperatura promedio entre 23 y 25 °C. La zona B está situada en la costa norte del país, a 50 m sobre el nivel del mar y con una temperatura diaria promedio mayor de 30°C. Todas las raíces de yuca fueron cosechadas entre 8 y 10 meses de edad.

De las raíces cultivadas en la zona A, se procesaron el almidón y la harina A en CLAYUCA-CIAT. El almidón A fue procesado a pequeña escala a partir de raíces maceradas, las cuales se filtraron en exceso de agua; la lechada resultante se puso a decantar para obtener el almidón, el cual se secó en forma natural bajo sombra. La harina de yuca A se obtuvo a partir de las raíces de yuca cortadas, secadas y molidas, posteriormente el producto se refinó, utilizando separaciones sucesivas con tamices cilíndricos.

De las raíces cultivadas en la zona B se obtuvieron el almidón y la harina B. El almidón B fue suministrado por Industrias del Maíz, S.A. (Cali, Colombia). Para obtener este almidón se utiliza el proceso convencional industrial para la extracción de almidón de yuca. La harina de yuca B también fue suministrada por esta industria. Para la fabricación de este producto se utilizan las corrientes de sub-productos de la línea de extracción de almidón.

Métodos

Análisis proximal y contenido de agua: La composición proximal del almidón y la harina de yuca fue analizada de acuerdo a los procedimientos estandarizados de la AOAC (23) para proteína, cenizas, grasa y fibra cruda. El contenido de agua se determinó secando a 105°C una muestra de aprox. 3 g. durante 4 h.

Contenido de amilosa en los almidones: El contenido de amilosa de los almidones se determinó utilizando el método calorimétrico propuesto por Gérard y col (24). Se trabajó en un calorímetro Perkin-Elmer DSC-7 (Perkin-Elmer, UK). Una muestra de 8 mg de almidón (b.s) se pesó en una cápsula de acero inoxidable de 50 µl, posteriormente se adicionaron 40 ml de una solución de LPC (solución de lisofosfatidilcolina al 2% p/p en agua) antes de sellar herméticamente la cápsula. Las muestras se calentaron desde 35°C hasta 150°C a una velocidad de calentamiento de 15 °Cmin⁻¹; se mantuvieron a esta temperatura durante 2 minutos y posteriormente se enfriaron a una velocidad de

10°Cmin⁻¹ hasta una temperatura de 45°C. Como referencia se utilizó una cápsula de 40 µl llena con agua destilada. La entalpía del proceso exotérmico de formación del complejo durante el enfriamiento se midió y se comparó con la entalpía del reactivo estándar amilosa de papa (28 Jg⁻¹). El contenido de amilosa se calculó como la relación entre la entalpía de la muestra y la del reactivo.

Calorimetría diferencial de barrido: Para el análisis de las propiedades térmicas de los materiales se trabajó con un calorímetro Perkin-Elmer DSC-7 (Perkin-Elmer INC, Beaconfield, UK), calibrado con indio (156.8 °C) y ciclohexano (6.7°C), según el método descrito por Farhat y col (25). Se utilizaron 10 mg (b.s) de muestra, la cual se pesó directamente en la cápsula de aluminio y se adicionó agua destilada hasta crear un ambiente en exceso de agua (relación aproximada 1:3). Las cápsulas se sellaron herméticamente y se colocaron en un dispositivo de agitación durante toda la noche con el propósito de lograr la completa hidratación de la muestra antes de llevar a cabo el análisis. La gelatinización se determinó entre 10 y 120°C, a una velocidad de calentamiento de 10°Cmin⁻¹, utilizando como referencia una cápsula vacía.

Medidas experimentales de flujo: Las mediciones experimentales para el estudio reológico se obtuvieron en un reómetro capilar de doble abertura Rosand RH 7 (Malvern Instruments, Worcestershire, UK), el cual presenta una boquilla capilar (l = 32 mm, φ = 2mm, θ = 90°) y una boquilla de orificio (l = 0 mm, φ = 2mm, θ = 90°). Las condiciones de proceso estudiadas fueron: temperaturas de 75°C, 90°C y 110°C, contenido de agua del material de 30%, 35% y 40% (b.h) y velocidades de corte entre 10 y 800 s⁻¹. Las condiciones de temperatura y contenido de agua se escogieron a partir de ensayos previos, en los cuales se observó que a esas condiciones existía un flujo continuo de material y no se presentaba separación del agua del resto de la masa. El acondicionamiento del material al contenido de agua deseado se realizó adicionando agua destilada mediante un atomizador y mezclando constantemente utilizando un mezclador (Kitchen aid Inc., Michigan, EUA). Posteriormente el material se empacó en bolsas de polietileno y se almacenó a 5°C durante 24 h para garantizar un contenido de agua homogéneo. Cada ensayo consistía en la alimentación del material a un contenido de agua determinado, dentro de la cámara de preacondicionamiento donde el material

permanecía (tiempo de residencia aprox. 10 min) hasta alcanzar la temperatura de estudio. Posterior a esto, los pistones se activaban, empujando el material simultáneamente hacia las boquillas. La velocidad de los pistones se incrementaba en siete etapas de acuerdo al proceso programado con el fin de obtener la caída de presión a diferentes velocidades de corte. Se realizaron cuatro réplicas por proceso. El equipo cuenta con medidores de presión para cada boquilla, los cuales se comunican directamente con un computador donde se lleva el registro de la presión ejercida por el material en ambas boquillas, en función de la velocidad del pistón. El programa calculó directamente la velocidad de corte a la pared y aplicó la corrección de Rabinowitsh asumiendo un modelo de ley de potencia (Ecuación 3). Las pérdidas de presión a la entrada del capilar se evaluaron sustrayendo los datos de la boquilla de orificio a los datos del capilar (22).

Los valores experimentales de velocidad de corte y viscosidad a condiciones específicas de proceso (agua y temperatura) se ajustaron al modelo de Harper (Ecuación 5), utilizando el programa estadístico Design Expert 6.0 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, USA), el cual determinó los parámetros de ajuste mediante regresiones lineales múltiples, trabajando el modelo en forma logarítmica, como se muestra en la Ecuación 6.

$$\ln \eta = \ln K_0 + (n-1) \ln \dot{\gamma} + \frac{\Delta E}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + b(MC) \quad (6)$$

Nomenclatura

ΔE	=	energía de activación (J / mol)
$\dot{\gamma}$	=	velocidad de corte (s ⁻¹)
$\dot{\gamma}_{ap}$	=	velocidad de corte aparente (s ⁻¹)
$\dot{\gamma}_w$	=	velocidad de corte a la pared (s ⁻¹)
η	=	viscosidad aparente (Pas)
K_0	=	índice de consistencia (Pas ⁿ)
L	=	longitud del capilar (mm)
MC	=	fracción másica de agua (b.h)
n	=	índice de comportamiento de flujo
ΔP	=	caída de presión (Pa)
Q	=	flujo volumétrico (mm ³ /s)
R	=	constante gases ideales (J / mol K)
r	=	radio capilar (mm)
τ_w	=	esfuerzo de corte a la pared (Pa)
T	=	temperatura (K)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de composición proximal, de los materiales estudiados se encuentran en los rangos esperados para almidones de yuca (26,27) (Véase tabla 1); las harinas de yuca presentaron una gran diferencia en el contenido de fibra cruda, por lo que se observa que el método de producción de la harina afecta ampliamente la composición química resultante. La harina B, que se produce con los subproductos de la extracción industrial de almidón, presentó un menor contenido de almidón y una mayor proporción de fibra cruda (12,43%); valores similares de contenido de fibra fueron reportados para fibra de yuca en Brasil (28). El nivel de grasa presente en las harinas fue más alto que el encontrado en los almidones de yuca. Este comportamiento ha sido reportado antes por Moorthy y col (29).

Tabla 1. Composición proximal de harinas y almidones de yuca. Valores en base seca¹.

	Almidón A	Almidón B	Harina A	Harina B
Proteína (%)	0.08 (0.01)	0.08 (0.02)	1.2 (0.04)	1.42 (0.18)
Cenizas (%)	0.06 (0.02)	0.13 (0.05)	1.73 (0.26)	1.25 (0.24)
Lípidos (%)	0.05 (0.01)	<0.01	0.35 (0.03)	0.50 (0.01)
Fibra (%)	N.D	N.D.	2.98 (0.4)	12.43 (0.10)

N.D. no determinado

¹ Los resultados son el promedio de tres réplicas. La desviación estándar se reporta dentro de los paréntesis^{*}.

El almidón B presentó un mayor contenido de amilosa ($20.09 \pm 0.14 \text{ kg kg}^{-1}$), mientras que el almidón A presentó ($18.17 \pm 0.02 \text{ kg kg}^{-1}$). Los valores de contenido de amilosa reportados en este estudio se encuentran en el rango $16 - 20 \text{ g kg}^{-1}$, reportado para variedades de yuca colombianas por Asaoka y col (26). Charles y col (29), Sriroth y col (30) reportan contenidos de amilosa entre $18 - 25 \text{ g kg}^{-1}$ para almidones de yuca de Tailandia. El almidón de yuca de la India presenta un contenido de amilosa entre $22 - 26 \text{ g kg}^{-1}$ (31).

Las propiedades térmicas de los almidones y harinas de yuca presentaron diferencias en los valores

de temperatura y entalpía de gelatinización (Véase tabla 2). El almidón B registró los valores más altos de temperatura y entalpía de gelatinización, lo cual está intrínsecamente relacionado con el contenido de amilasa: a mayor contenido de amilosa la temperatura de gelatinización es mayor. De igual forma existe una influencia de las condiciones ambientales. En cereales, a mayor temperatura ambiental se observa un incremento en la temperatura de gelatinización (33, 34); en la literatura se asume que el almidón de cereales y el de raíces presentan los mismos mecanismos de gelatinización y ambos son influenciados por las condiciones ambientales durante la síntesis (30). Las harinas de yuca presentaron valores similares de temperatura de inicio de gelatinización; sin embargo, la entalpía de gelatinización fue menor, lo cual se explica por el menor contenido de almidón característico de cada harina y en la influencia de los otros compuestos presentes (como proteína y fibra), lo cual ha sido reportado para harina de yuca por Moorthy y col (32).

Tabla 2. Propiedades térmicas por calorimetría diferencial de barrido para almidón y harina de yuca¹

Material	Temperatura inicial (°C)	Temperatura pico (°C)	Temperatura final (°C)	Entalpía ΔH (Jg ⁻¹)
Almidón A	60.69 (0.53)	65.44 (0.51)	71.36 (0.98)	13.96 (0.06)
Almidón B	66.51 (0.24)	72.00 (0.44)	79.26 (0.33)	15.50 (0.74)
Harina A	60.99 (0.71)	66.14 (0.33)	69.91 (0.14)	7.75 (0.07)
Harina B	66.01 (0.41)	71.00 (0.22)	77.22 (0.59)	8.11 (0.64)

¹ Los resultados son el promedio de tres réplicas. La desviación estándar se reporta dentro de los paréntesis.

Los materiales acondicionados a diferentes contenidos de humedad se procesaron a diversas condiciones de temperatura y velocidad de corte. En las figuras 1 y 2 se presenta separadamente el efecto del cambio de la temperatura de proceso y del contenido de humedad en la viscosidad del almidón A; sin embargo, este comportamiento fue aproximadamente similar para todos los materiales. Las masas fundidas de almidón de yuca estudiadas presentaron un comportamiento característico de adelgazamiento por corte, es decir, desarrollaron una menor viscosidad a medida que se incrementaba la velocidad de corte (Véase figura 1), lo cual

* Se trabajó la desviación estándar por ser el parámetro que más se reporta en la literatura. Para explicar estas desviaciones tan altas en valores extremadamente pequeños, como son porcentajes menores al 1%, nos remitimos al método de valoración. Variaciones de 0.02 en 0.08 nos dan desviaciones estándar del 20%, pero ese mismo valor en porcentajes mayores es menor al 10%. La explicación reside en la baja precisión de la determinación a porcentajes menores del 1% siguiendo los métodos estándares. Sin embargo, la tendencia central se encuentra entre los valores de composición que se reportan para almidón y harina de yuca.

se explica por la degradación por fricción de las moléculas (amilosa y amilopectina) que componen el almidón. A los distintos contenidos de agua estudiados se presentó una gelatinización parcial del almidón (hinchamiento), lo que facilitó la degradación de las moléculas en cadenas de glucosa de menor tamaño que desarrollan menor viscosidad (12). De igual forma se observa el efecto que tiene la temperatura de proceso: a medida que aumenta la temperatura la viscosidad disminuye; este efecto es mayor para la masa fundida del almidón A que para el almidón B. Al trabajar mayores temperaturas se alcanza una mayor fusión de los cristales de amilopectina que forman el almidón por lo que la viscosidad disminuye (8); el mayor efecto en las masas de almidón A se explica por la menor temperatura de gelatinización que este almidón presenta, es proporcional al contenido de amilosa.

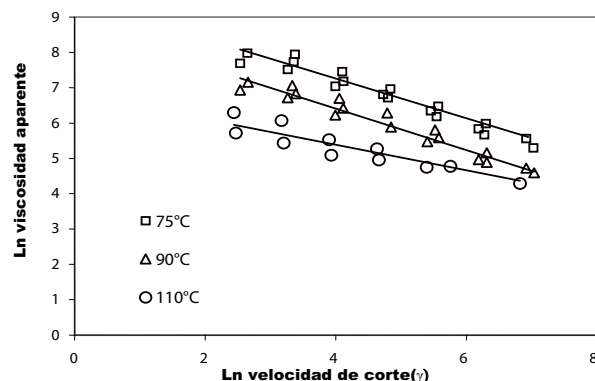


Figura 1. Viscosidad por fricción en función de la velocidad de corte de la masa fundida de almidón de yuca A, acondicionado a 35% de contenido de agua (b.h) y procesada a 70, 90 y 100°C.

Por otra parte, a medida que aumenta el contenido de agua inicial, la viscosidad por fricción disminuye (Véase figura 2); este efecto es similar para los cuatro materiales pero se muestra únicamente para la masa fundida del almidón A, la cual presentó una mayor sensibilidad al cambio en el contenido de agua inicial. La disminución en la viscosidad puede estar relacionada con la ocurrencia de dos fenómenos simultáneos, una mayor gelatinización del gránulo de almidón, lo que se traduce en un mayor grado de hinchamiento, y mayor facilidad de degradación por fricción de las moléculas por efecto de la velocidad de corte (12).

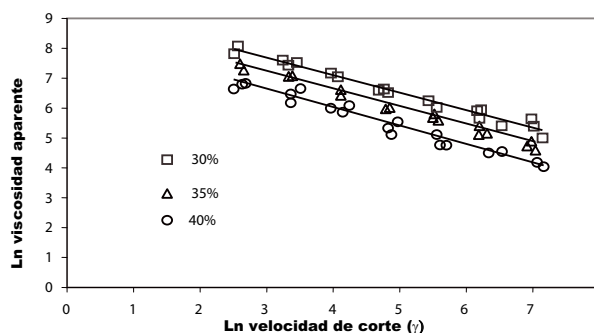


Figura 2. Viscosidad por fricción en función de la velocidad de corte de la masa fundida de almidón de yuca A, medida a 90°C y acondicionada a 30%, 35% y 40% de contenido de agua (b.h).

Los datos experimentales de los materiales acondicionados a diferentes contenidos de humedad y procesados a distintas condiciones de temperatura e intervalos de velocidad de corte en el reómetro, se ajustaron al modelo reológico de Harper (ecuación 5). El ajuste al modelo reológico de Harper requiere asumir las siguientes consideraciones: el flujo está completamente desarrollado a través del capilar y se encuentra en régimen laminar, no existe disipación viscosa ni se presenta deslizamiento del material en la pared, no existe pérdida de presión al final del capilar y el fluido se comporta de acuerdo a la ley de potencia (4,6). Los parámetros de regresión, determinados cuando los datos experimentales se ajustaron al modelo de Harper, presentaron un R² mayor de 0.92, lo que significa un buen ajuste del modelo a los datos y la posibilidad de utilizar la ecuación como una herramienta de diseño y para estimación de datos (Véase tabla 3).

Tabla 3. Parámetros del modelo de Harper para los almidones y harinas de yuca.

Material	K ₀	n	$\Delta E/R$	b	R ²
Almidón A	2.71	0.35	4908	-15.2	0.92
Almidón B	3.66	0.35	4645	-12.8	0.97
Harina A	0.52	0.31	5119	-10.2	0.97
Harina B	164	0.32	2962	-8.89	0.93

En las figuras 3 y 4 se presentan los valores de ln viscosidad estimados por el modelo de Harper para las masas fundidas de almidón y harina de yuca. En ellas se observa conjuntamente el efecto del cambio en la temperatura de proceso y el contenido de

humedad inicial en la viscosidad del material a una velocidad de corte de 400 s^{-1} . Las pastas de las harinas y los almidones de yuca estudiados presentaron un comportamiento pseudoplástico característico: a medida que se incrementaba la velocidad de corte la viscosidad de los materiales disminuía; este comportamiento para pastas extrudidas ha sido reportado anteriormente (5; 35). El valor de n encontrado para los dos almidones fue de 0.35, lo que indica que los almidones presentaron una sensibilidad similar al cambio de la velocidad de corte. Los valores de n para masas alimenticias, principalmente a partir de cereales, varían en un rango entre 0.25 – 0.75 (31).

Della Valle y col. (13) reportan valores de n para almidón de papa entre 0.4 – 0.5. Los valores de n encontrados para las masas fundidas de harina de yuca fueron menores, comparados con los valores de los almidones, lo que indica que estos materiales son menos sensibles al cambio de la velocidad de corte. Esto se puede explicar en el componente fibroso de la harina que permanece estable durante la extrusión y de esta forma disminuye el tratamiento mecánico ejercido sobre la masa, es decir, no existe una degradación de las macromoléculas, por lo que la viscosidad no disminuye.

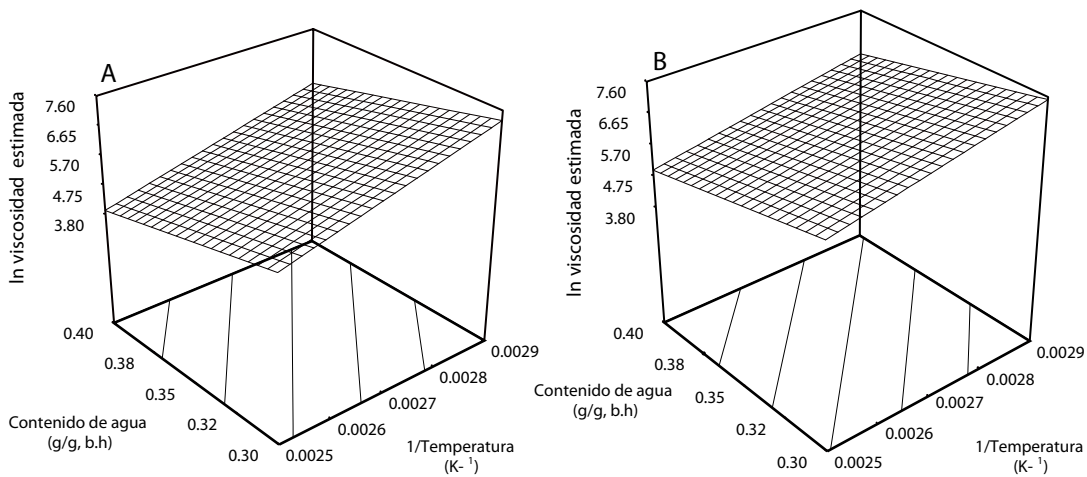


Figura 3. Gráfica del \ln de la viscosidad de fricción estimada por el modelo de Harper en función del contenido de agua y el inverso de la temperatura de proceso a velocidad de corte de 400 s^{-1} . Masa fundida almidón A (izquierda) y almidón B (derecha).

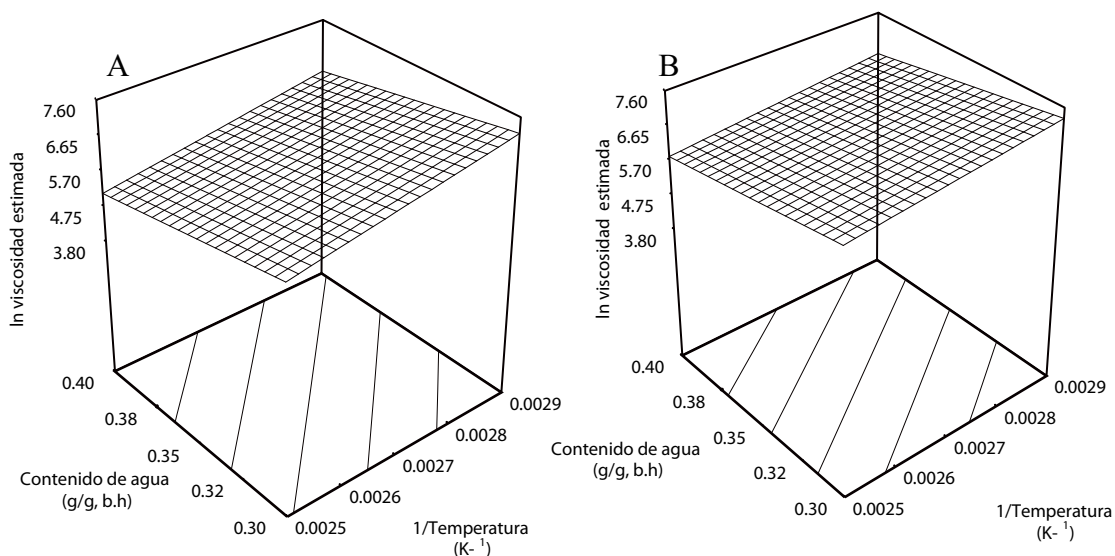


Figura 4. Gráfica del \ln viscosidad estimada por el modelo de Harper en función del contenido de agua y el inverso de la temperatura de proceso a velocidad de corte de 400 s^{-1} . Masa fundida de harina A (izquierda) y harina B (derecha).

Las masas fundidas de harinas de yuca presentaron comportamientos muy diversos. La harina B exhibió un valor de coeficiente de consistencia K_0 muy alto, influenciado por el alto contenido de fibra de este material. La fibra cruda presenta una baja capacidad de hidratación y, adicionalmente, interfiere con el proceso de gelatinización del almidón, por lo que la viscosidad inicial de este material es muy alta y se ve reflejada en el valor de K_0 . Por otra parte, los coeficientes que acompañan al inverso de la temperatura y del contenido de agua fueron los más bajos de todos los materiales, lo que indica que la viscosidad de la masa fundida de la harina B no es sensible al cambio de las condiciones de proceso. Este comportamiento se explica igualmente en la competencia por el agua de los componentes de la harina, como la proteína y la fibra, los cuales afectaron el proceso de gelatinización del almidón, por lo que no existió un cambio apreciable en la viscosidad; Mackey y Ofoli (10) reportaron un comportamiento similar para masas de harina de trigo. Entre los cuatro materiales, la harina A exhibió el menor índice de consistencia, aún más bajo que el del almidón A; esta tendencia puede explicarse por la presencia de lípidos, que facilitan el flujo de la pasta disminuyendo K_0 . La harina B presentó un mayor contenido de lípidos; sin embargo, su efecto disminuyó debido a la mayor proporción de fibra presente.

La dependencia de la viscosidad de los materiales con respecto al contenido de agua fue muy diversa. Observando el coeficiente que acompaña al contenido de agua, se deduce que las masas fundidas del almidón A presentaron una mayor sensibilidad al cambio en el contenido de agua inicial. El agua inicial influye directamente en la gelatinización del almidón: a mayor contenido de agua se presenta una mayor gelatinización e hinchamiento del gránulo del almidón, por lo que la viscosidad rápidamente disminuye cuando las moléculas de amilopectina

y amilosa se rompen en moléculas de glucosa de menor tamaño debido al efecto de la velocidad de corte. El menor efecto del contenido de agua en la viscosidad de las masas fundidas de las harinas se explica por la presencia de proteína y fibra, lo que interfiere con el proceso de gelatinización e hinchamiento.

Por otra parte, los valores de energía libre de activación variaron ampliamente entre materiales; el almidón A y la harina A presentaron los mayores valores del parámetro $\frac{\Delta E}{R}$, lo cual indica una mayor disminución en la viscosidad de los materiales cuando se incrementa la temperatura de trabajo. Este comportamiento puede estar relacionado con la temperatura de gelatinización, la cual fue menor para estos dos materiales (Véase tabla 2). Al presentar una menor temperatura de gelatinización, el gránulo de almidón se gelatiniza e hincha fácilmente, lo que permite una mayor degradación de las macromoléculas; de igual forma, también se presenta la fusión de los cristales de amilopectina.

A pesar de los numerosos estudios de modelamiento reológico aplicando el modelo de Harper, no es posible realizar una adecuada comparación entre los resultados obtenidos en esta investigación y los obtenidos en otros estudios en masas de cereales, por la diferencia en los materiales y la diversidad de condiciones de extrusión (35). En la figura 5 se presentan las gráficas de viscosidad estimada por el modelo reológico de Harper, en función de la viscosidad observada para las masas de almidón de yuca. Como se observa, el modelo predice adecuadamente el comportamiento de los materiales y el efecto que tiene cada condición de proceso (temperatura, contenido de humedad y velocidad de corte) en la viscosidad de la masa fundida, por lo que puede utilizarse como herramienta para modelar el proceso de extrusión de estos materiales cuando se trabaja en condiciones similares a las estudiadas.

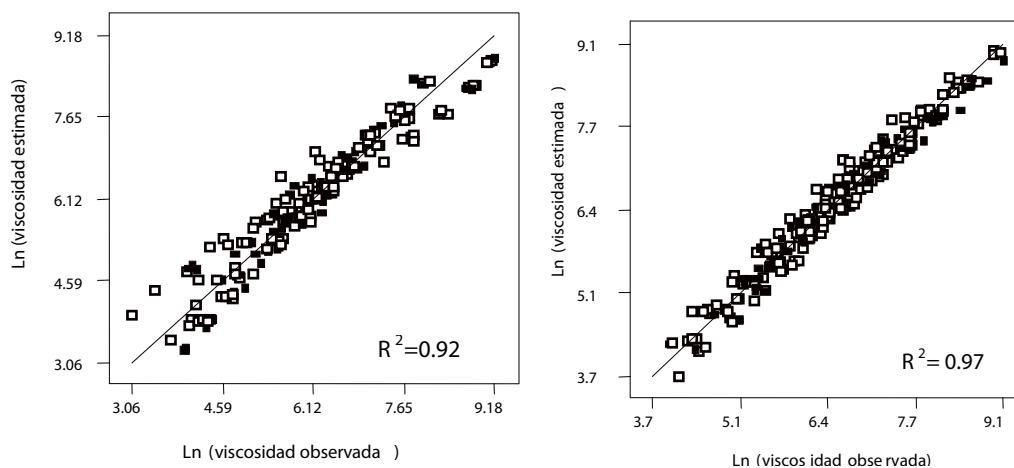


Figura 5. Predicción de la viscosidad de las masas fundidas de almidón de yuca A (izquierda) y B (derecha), utilizando el modelo de Harper.

CONCLUSIÓN

El reómetro capilar de alta presión permitió obtener la información necesaria para el estudio del comportamiento reológico de los materiales derivados de yuca a condiciones de procesamiento específicas. El modelo reológico de Harper permitió ver claramente el efecto de la temperatura, el contenido de agua y la fricción en la viscosidad de los materiales.

Cada material presentó un comportamiento reológico característico de adelgazamiento por corte. La viscosidad de las masas de los almidones demostró una mayor tendencia a disminuir la viscosidad con el aumento de la velocidad de corte, lo que indica una mayor sensibilidad a la degradación por fricción; de igual forma, la viscosidad de las masas fundidas de estos materiales presentó una mayor variación al cambio de las condiciones de proceso. La comparación del comportamiento de los materiales estudiados nos permitió observar diferencias intrínsecas entre almidones y harinas de yuca, que se explican por las propiedades fisicoquímicas de cada material. Se observó un efecto del contenido de amilosa en la temperatura de gelatinización, que se ve reflejado en un menor cambio en la viscosidad del material cuando la temperatura de proceso aumenta. Por otra parte, en las harinas, la presencia de otros compuestos (fibra y proteína) que interfieren en la gelatinización, afecta la viscosidad desarrollada por el material, la cual se caracteriza por no exhibir un gran cambio cuando se modifican las condiciones de proceso.

AGRADECIMIENTOS

A. Sandoval-Aldana agradece a COLCIENCIAS por la beca de investigación otorgada. De igual forma los autores agradecen a Industrias del Maíz S.A. y CLAYUCA-CIAT, por la logística y el suministro de los materiales de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lai LS, Kokini JL. Physicochemical Changes and Rheological Properties of Starch during Extrusion. *Biotechnol Progr* 1991; 7(3): 251-266.
- Mackey KL, Ofoli RY. Rheological Modeling of Corn Starch Doughs at Low to Intermediate Moisture. *J Food Sci* 1990; 55(2): 417-423.
- Akdogan H. High Moisture Food Extrusion. *Int J Food Sci and Technol* 1999; 34: 195-207.
- Altomare RE, Anelich M, Rakos R. An Experimental Investigation of the Rheology of Rice Flour Dough with an Extruder-coupled Slit Die Rheometer. En: Kokini JL, Ho C-T, Karwe MV, eds. *Food Extrusion Science and Technology*. New York: Marcel Dekker; 1992. pp. 233-254.
- Davidson VJ. The Rheology of Starch-based Materials in Extrusion Processes. En: Kokini JL, Ho C-T, Karwe MV, eds. *Food Extrusion Science and Technology*. New York: Marcel Dekker; 1992. p. 263-276.
- Harper JM. *Extrusion of Foods*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1981.
- Padmanabhan M, Bhattacharya M. Flow Behavior and Exit Pressures of Corn Meal under High-shear-high Temperature Extrusion Conditions using a Slit Die. *J Rheol* 1991; 35(3): 315-343.
- Lai LS, Kokini JL. The Effect of Extrusion Operating Conditions on the On-line Apparent Viscosity of 98% Amylopectin (Amioca) and 70% Amylose (Hylon 7) Corn Starches during Extrusion. *J Rheol* 1990; 34 (8): 1245-1264.
- Wang SM, Bouvier JM, Gelus M. Rheological Behaviour of Wheat Flour Dough in Twin-screw Extrusion Cooking. *Int J Food Sci Tech* 1990; 25: 129-139.
- Mackey KL, Ofoli RY. Rheology of Low-to intermediate-moisture Whole Wheat Flour Doughs. *Cereal Chem* 1990; 67 (3): 221-226.

11. Senouci A, Smith AC. An Experimental Study of Food Melt Rheology. I. Shear Viscosity using Slit Die Viscometer and a Capillary Rheometer. *Rheologica Acta* 1988; 27(5):546-554.
12. Vergnes B, Villemaire JP. Rheological Behaviour of Low Moisture Molten Maize Starch. *Rheologica Acta* 1987; 26(3): 570-576.
13. Della Valle G, Boche Y, Colonna P, Vergnes B. The Extrusion Behaviour of Potato Starch. *Carbohydr Polymer* 1995;28(3):255-264.
14. Halliday PJ, Smith AC. Estimation of the Wall Slip Velocity in the Capillary Flow of Potato Granule Pastes. *J Rheol* 1995; 39 (1):139-149.
15. Mackey KL, Ofoli RY, Morgan RG, Steffe JF. Rheological modeling of potato flour during extrusion cooking. *Journal of food process engineering* 1989; 12 (2):1-11.
16. Rooney LW, Huang DP. Starches for snack foods. En: Lusas EW, Rooney LW, editors. *Snack Foods Processing*. Pennsylvania: Technical Publishing Company; 2001. p.115-130
17. Fernández-Quintero A. Effect of Processing Procedures and Cultivar on the Properties of Cassava Flour and Starch. [Tesis doctoral]. University of Nottingham; 1996
18. Niba LL, Bokanga MM, Jackson EL, Schlimme DS, Li BW. Physicochemical Properties and Starch Granular Characteristics of Flour from various *Manihot Esculenta* (Cassava) Genotypes. *J Food Sci* 2001; 67 (5):1707-1705.
19. Raupp DS, Moreira SS, Banzatto DA. Composicao e propriedades fisiogico-nutritivas de uma farinha rica em fibra insolúvel obtida do residuo fibroso de fecularia de mandioca. *Cienc Tecnol Alimentaria* 1999; 19(2):205-210.
20. Rao MA. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods*. Gaithersburg: Aspen;1999
21. Bhattacharya S, Padmanabhan M. On-line Rheological Measurements of Food Dough during Extrusion Cooking. En: Kokini JL, Ho C-T, Karwe MV, eds. *Food Extrusion Science and Technology*. New York: Marcel Dekker; 1992. p. 213-237.
22. Steffe JF. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman Press, East Lansing Minnesota; 1992
23. AOAC Official Methods of Analysis (CD-Rom), Gaithersburg, Md: Association of Official Analytical Chemists; 1998.
24. Gérard C, Barron C, Colonna P, Planchot V. Amylose Determination in Genetically Modified Starches. *Carbohydr Polymer* 2001; 44 (1): 10-27.
25. Farhat IA, Oguntona T, Neale RJ. Characterization of Starches from West African Yams. *J Sci Food Agr* 1999; 79:2105-2112.
26. Asaoka M, Blanshard JMV, Rickard JE. Seasonal Effects on the Physico-chemical Properties of Starch from four Cultivars of Cassava. *Starch/Stärke* 1991 ;43(12):455-459.
27. Rickard JE, Asaoka M, Blanshard JMV. The Physicochemical Properties of Cassava Starch. *Trop Sci* 1991; 31:189-207
28. Leonel M, Cereda MP. Extracao da fecula retida no residuo fibroso do processo de producao de fecula de mandioca. *Cienc Tecnol Alimentaria* 2000; 20(1):122-127
29. Charles AL, Chang Y-H, Ko W-C, Sriroth K, Huang T-C. Some Physical and Chemical Properties of Starch Isolates of Cassava Genotypes. *Starch/Stärke* 2004;56(9): 413-418.
30. Sriroth K, Santisopasri V, Petchalanuwat C, Kiurotjanwong K, Piyachomkwan K, Oates CG. Cassava Starch Granule Structure-function Properties: Influence of Time and Conditions at Harvest on Four Cultivar of Cassava Starch. *Carbohydr Polymer* 1999; 38(2): 161-170.
31. Moorthy SN, Wenham JE, Blanshard JMV. Effect of Solvent Extraction on the Gelatinisation Properties of Flour and Starch of Five Cassava Varieties. *J Sci Food Agr* 1996; 72 (3): 329-336.
32. Moorthy SN, Rickard J, Blanshard JMV. Influence of Gelatinization Characteristics of Cassava Starch and Flour on the Textural Properties of some Food Products. En: Dufour D, O'Brien GM, Best R, eds. *Cassava Flour and Starch: Progress in Research and Development*. Cali: CIAT; 1996. p. 150-154
33. Asaoka M, Okuno K, Sugimoto Y, Kawakami J, Fuwa H. Effects of Environmental Temperature during Development of Rice Plants on some Properties of Endosperm Starch. *Starch/Stärke* 1984;36 (6):189-193
34. Tester RF, Morrison WR. Swelling and Gelatinization of Cereal Starches. I. Effect of Amylopectin, Amylose and Lipids. *Cereal Chem* 1990; 67(3):551-557.
35. Colonna P, Tayeb J, Mercier C. Extrusion Cooking of Starch and Starchy Products. En: Mercier C, Linko P, Harper JM, eds. *Extrusion Cooking*. St Paul, Minnesota: AACCC; 1989. p. 247-316.

DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS

38 años de labores académicas

Sede central

Convenio con el municipio de Envigado

Programas en Regionalización

11 años presencia viva en Región
(Carmen de Viboral, Puerto Berrío, Santafé de Antioquia, Yarumal)

Programas Adscritos

Ingeniería de Alimentos
Ciencia y Tecnología de Alimentos

Tecnología de Alimentos

Facultad de Química Farmacéutica - Universidad de Antioquia
Teléfono: 210 54 65 - Correo electrónico: cta@farmacia.udea.edu.co