



**DIGESTIBILIDAD *in vitro* Y PROPIEDADES TÉRMICAS, MORFOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE HARINAS Y ALMIDONES DE AVENAS DE DIFERENTES VARIEDADES**

***In vitro* DIGESTIBILITY AND THERMAL, MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF FLOURS AND OAT STARCHES OF DIFFERENT VARIETIES**

P.B. Zamudio-Flores<sup>1\*</sup>, J.M. Tirado-Gallegos<sup>1</sup>, J.G. Monter-Miranda<sup>1</sup>, A. Aparicio-Saguilán<sup>2</sup>, J.G. Torruco-Uco<sup>3</sup>, R. Salgado-Delgado<sup>4</sup> y L.A. Bello-Pérez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Cuauhtémoc, Fisiología y Tecnología de Alimentos de la Zona Templada. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

<sup>2</sup>Instituto de Química Aplicada. Universidad del Papaloapan. Tuxtepec, Oaxaca, México.

<sup>3</sup>Inst. Tec. de Tuxtepec. Depto. de Ingeniería Química y Bioquímica. Tuxtepec, Oaxaca, México.

<sup>4</sup>Inst. Tec. de Zacatepec, Depto. de Posgrado en Ingeniería Química y Bioquímica, Zacatepec, Morelos, México.

<sup>5</sup>Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del IPN, Yautepec, Morelos, México.

Recibido 15 de Julio de 2014; Aceptado 19 de Febrero de 2015

**Resumen**

Se evaluó la digestibilidad *in vitro* de harinas y almidones de tres variedades de avena (*Avena sativa* L. cv “Cuauhtémoc”, “Teporaca” y “Bachíniva”) cultivadas en la región noroeste (Chihuahua) de México. Se prepararon las harinas y se aisló el almidón, se estudiaron las propiedades fisicoquímicas (evaluación de color y análisis químico proximal, cuantificación de almidón total, almidón resistente y el contenido de amilosa aparente) y se determinaron sus propiedades térmicas, reológicas y funcionales utilizando las técnicas de calorimetría diferencial de barrido, curvas de flujo en estado estable, poder de hinchamiento y solubilidad, así como estabilidad al congelamiento-deshielo. Entre las diferentes harinas y almidones no se observaron diferencias significativas; sin embargo la digestibilidad fue mayor en los almidones, indicando la presencia de otros compuestos (fibra dietaria total) que pueden disminuir su digestibilidad en las harinas. La harina y almidón de cv Cuauhtémoc presentaron el mayor  $\Delta H$  en comparación con la harina y almidón de la cv Bachíniva y Teporaca. La estabilidad al congelamiento-deshielo aumentó conforme incrementó el número de ciclos, pero disminuyó cuando aumentó la temperatura. Estas variedades podrían encontrar aplicación en diversos alimentos y podrían ser una fuente de alimentación para personas con desórdenes alimenticios (enfermos celíacos).

*Palabras clave:* digestión *in vitro* de almidón, propiedades térmicas, almidón de avena, propiedades funcionales.

**Abstract**

*in vitro* digestibility of flours and starches from three varieties of oats (*Avena sativa* L. cv “Cuauhtémoc”, “Teporaca” and “Bachíniva”) grown in the northwestern region (Chihuahua State) of Mexico were evaluated. The physicochemical properties (color evaluation and proximate analysis, quantifying of total and resistant starch and the apparent amylose content) were studied and the thermal properties were determined, pasting, rheological and functional using differential scanning calorimetry, rapid visco-analysis of viscosity, flow curves at steady state, swelling power, solubility and stability to freeze-thawing, respectively. Among the flours and starches no significant difference was observed, however the digestibility was higher in starch, indicating the presence of other compounds which can encourage digestibility, which was confirmed in the proximal and in the determination of electron microscopy analysis sweep. Flour and starch had the highest cv Cuauhtémoc  $\Delta H$  compared with the flour and starch Bachíniva and Teporaca. The functional properties of freeze-thawing stability increased with increasing number of cycles; however, decreased when the temperature increased. These varieties could find any practical application in various food systems and could be a potential food source for people with eating disorders (v. gr. celiac patients).

*Keywords:* *in vitro* starch digestibility, thermal properties, oat starch, functional properties.

\*Autor para la correspondencia. E-mail: : pzamudio@ciad.mx  
Tel. 625 5812920, 21 y 70, Ext. 111

## 1 Introducción

La avena (*Avena sativa*) es un cereal que se cultiva en las regiones templadas de diversas partes del mundo (Canadá, Estados Unidos, Rusia, China) ya que se adapta mejor a los climas fríos y húmedos (Morris y Bryce, 2000). Este cereal es diferente a los demás debido a sus características multifuncionales y perfil nutricional (Biel y col., 2009; Butt y col., 2008; Inglett y col., 2014; Liu y col., 2010). Debido a que el almidón es el componente mayoritario de los granos de avena, las propiedades fisicoquímicas, funcionales y nutritivas de este carbohidrato desempeñan un papel importante en la determinación de la calidad de las harinas durante su procesamiento (Hartmann y Koehler, 2008; van Der Borght y col., 2005). La digestión del almidón es una respuesta metabólica importante, donde la velocidad y grado de digestión, así como su absorción en el intestino delgado, son características importantes en la nutrición (Sasaki y col., 2009), ya que determinan cuanta glucosa se absorberá hacia el torrente sanguíneo. Diversos estudios han mostrado una alta correlación entre la velocidad de digestión del almidón y la respuesta glucémica por varios métodos de digestión *in vitro* que simulan la situación *in vivo* (Kim y White, 2012; Magaletta y col., 2010; Sáyo-Ayerdi y col., 2005).

Actualmente se han reportado diferentes estudios sobre la velocidad y el nivel de digestibilidad de diversos almidones de cereales como el maíz (Shrestha y col., 2012; Zhang y col., 2012; Zhang y col., 2014), arroz (Hu y col., 2004; Lee y col., 2013; Zhang y col., 2011), trigo (Alsaffar, 2010; Aravind y col., 2013; Hu y col., 2014) y cebada (Deckardt y col., 2014; Kim y col., 2013; Vasanthan y Bhatti, 1998); sin embargo, los análisis completos donde se reporten la velocidad de hidrólisis y digestibilidad de harinas y almidones son escasos, destacando las investigaciones realizadas por Kim y White (2012) donde evaluaron la velocidad de digestión *in vitro* del almidón y la estimación del índice glucémico en harinas y almidones de avenas de variedades típicas (“Jim” y “Paul”) y líneas altas en  $\beta$ -glucanos (IA95 y N979, desarrolladas en la Universidad Estatal de Iowa, USA). Los resultados de estos investigadores mostraron que la fibra soluble ( $\beta$ -glucanos) disminuyeron la velocidad de digestión del almidón sin que hubiera diferencia significativa en la digestibilidad del almidón entre los almidones de avenas extraídas de las diferentes líneas.

La región noroeste de México (estado de Chihuahua) se caracteriza por una amplia cultura ganadera y agrícola, en este último sector sobresale el

cultivo del cereal de avena y sobre todo las variedades de avena “Teporaca”, “Cauhtémoc” y “Bachíniva”. Esta última se liberó como una alternativa para sustituir a las variedades precoces “Páramo” y “Cusihuirachi”, las cuales son susceptibles a las enfermedades de roya de avena. Las características agronómicas de las avenas “Teporaca”, “Cauhtémoc” y “Bachíniva” destacan por su buena adaptación y su mayor rendimiento en comparación con las otras variedades de avena (Salmerón, 2002). Al momento y a pesar de que las avenas de las variedades “Bachíniva”, “Teporaca” y “Cauhtémoc” son los cereales más cultivados y cosechados en la región, poco se conoce en cuanto al aspecto de digestibilidad, y sobre la composición fisicoquímica y funcional de las harinas y sus almidones. Por tal razón, el objetivo de este estudio consistió en comparar la digestibilidad *in vitro* de harinas y almidones de avena de las variedades “Bachíniva”, “Teporaca” y “Cauhtémoc” y realizar una caracterización térmica, morfológica y funcional.

## 2 Metodología

### 2.1 Materiales

Se obtuvo un lote de 20 kg del cereal de avena variedad “Bachíniva”, el cual fue proporcionado por la empresa “Avenas del Norte” localizada en Ciudad Cauhtémoc, Chihuahua. Las restantes variedades de avena (“Teporaca” y “Cauhtémoc”) fueron proporcionadas por el Sr. José de la O Salas en lotes de 3 kg cada uno. Todos los reactivos químicos utilizados para los análisis químicos fueron de grado analítico y se adquirieron del proveedor Sigma-Aldrich, Co. (Toluca, Estado de México, México).

#### 2.1.1 Obtención de la harina

Las harinas se obtuvieron de acuerdo al método reportado por Bello-Pérez y col. (2010) con algunas modificaciones. Los granos de avena se remojaron (16-24 h) en una solución amortiguadora de acetato de sodio (0.02 M) la cual contenía cloruro de mercurio (0.01 M, en la relación 1:1 v/v) y después se ajustó el pH a 6.5 con una solución amortiguadora de acetato de sodio 2 M. Se utilizó una relación de grano/solución de remojo de 1:2 (p/v). La mezcla se mantuvo a temperatura ambiente ( $20 \pm 3$  °C) y fue agitada por periodos de 30 min durante 24 h. La solución se desechó, y los granos se lavaron con agua destilada. Posteriormente, se molieron los granos

(150 g) en una licuadora (Waring Laboratory, modelo 38BL54, Torrington, Connecticut, EUA) con 500 mL de agua a la máxima velocidad por 1.5 min. La dispersión se tamizó por las mallas estándar ASTM no. 40 (425  $\mu\text{m}$ ), 100 (150  $\mu\text{m}$ ), 200 (75  $\mu\text{m}$ ), 270 (53  $\mu\text{m}$ ) y 325 (45  $\mu\text{m}$ ) empleando una tamizadora eléctrica (Retsch, modelo AS 200 Control, Haan, Alemania). Finalmente, se secó el filtrado (40 °C) en una estufa (VWR, Scientific Products, modelo 1370GM-2, Cornellius, Oregon, USA) por 24 h.

## 2.2 Aislamiento de almidones y análisis químico proximal

Los almidones se aislaron a partir de la harina de avena de acuerdo a la metodología reportada por Hoover y col. (2010) para lo cual se formó una dispersión al 35 % (p/v) con agua destilada y se ajustó a pH 9 con NaOH 1 M (en agitación constante a 250 rpm). Se dejó reposar por 4 h y después se realizó un lavado, nuevamente se dejó reposar 4 h y se repitió el lavado con agua destilada. Posteriormente, se filtró a través de un tamiz estándar de 70  $\mu\text{m}$  (US 200) y se desechó el sobrenadante; el filtrado se ajustó a pH 7 con HCl 0.1 N bajo agitación constante (250 rpm) y se dejó reposar por 4 h repitiéndose este paso con 2 lavados más, dejando 4 h en reposo, después se secó en una incubadora (FinePCR, modelo combi-SV12DX, Daigger, Vernon Hills, IL, EUA) a 35 °C por 24 h. Se realizó el análisis químico proximal a las muestras de harinas y almidones determinando el contenido de proteínas, lípidos, humedad y cenizas utilizando los procedimientos oficiales de la AOAC (2002) (métodos 954.01, 920.39, 942.05, 934.01, y 942.05, respectivamente).

## 2.3 Determinación del almidón total (AT)

En los almidones se determinó el contenido de AT mediante una cuantificación que estima la cantidad total de almidón que está disponible a la hidrólisis enzimática. Esta determinación se realizó utilizando la metodología reportada por Goñi y col. (1997) para lo cual se dispersaron 50 mg de la muestra en una solución de KOH a la concentración de 2 M para hidrolizar todo el almidón que pudiera contener la muestra durante 30 min y posteriormente se incubó a 60 °C, durante 45 min a un pH de 4.75 con una solución de la enzima amiloglucosidasa (Marca Roché, núm. 102 857, Roche Diagnostics, IN, EUA), transcurrido este tiempo se procedió a determinar el contenido de glucosa liberada utilizando el ensayo

de glucosa oxidasa/peroxidada (GOD/PAD) (SERA-PAK® Plus, Bayer de México, S.A. de C.V.). El contenido de AT se calculó como glucosa (mg)  $\times$  0.9, como referencia se utilizó almidón de papa.

## 2.4 Contenido de amilosa aparente

El contenido de amilosa aparente en los almidones se determinó utilizando el método reportado por Espinosa-Solis y col. (2009) para lo cual las muestras de almidón se desgrasaron utilizando un aparato Soxhlet (modelo SER 148 Solvent Extractor, VELP Scientifica, Italia) y una solución de metanol al 85 % (v/v) por 24 h. Las muestras se lavaron con etanol y se recuperaron por filtración. Se midieron las afinidades de los almidones desgrasados al reactivo yodo utilizando un potenciómetro automático (modelo 702 SM Tirino, Metrohm, Herisau, Suiza) siguiendo la metodología reportada por Kasemsuwan y col. (1995). El contenido de amilosa aparente se calculó de dividir la afinidad al yodo de los almidones desgrasados por 20 % como reportaron Takeda y col. (1987). El análisis se realizó por triplicado para cada muestra de almidón.

## 2.5 Digestibilidad *in vitro*

La digestibilidad *in vitro* se determinó por el método reportado por Englyst y col. (1992) y Regand y col. (2011) con modificaciones. La solución enzimática para la digestión se preparó de la siguiente manera: Se dispersó 0.9 g de pancreatina porcina (CE 232.468.9, de páncreas de cerdo, actividad 8  $\times$  USP/g, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) en 4 mL de agua destilada y se centrifugó a 1,500  $\times$  g por 10 min. Se mezcló el sobrenadante (5.4 mL) con 0.8 mL de amiloglucosidasa diluida [0.64 mL de amiloglucosidasa (CE 3.2.1.3, 3300 U/mL, Megazyme) diluido a 0.8 mL de agua destilada], y se agregó 0.2 mL de agua destilada. Esta solución enzimática se preparó para cada digestión enzimática.

Se pesaron 100 mg de las harinas, almidones y un control (pan blanco elaborado con harina de trigo) en tubos de 50 mL, por triplicado, y se agregaron a cada tubo 10 perlas de vidrio (diámetro = 5 mm). Se agregaron a los tubos 2 mL de HCl (0.05 M) y 10 mg de pepsina, y se incubaron (37 °C, 30 min) en un baño con agitación. Posteriormente, se agregó a cada tubo 4 mL de solución amortiguadora de acetato de sodio (0.5 M, pH = 5.2); la solución enzimática preparada recientemente se agregó (1 mL) en intervalos de 1 min. Las mezclas se incubaron a 37 °C en un baño de agua con agitación. Se tomaron alícuotas (100  $\mu\text{L}$ )

a intervalos de 0, 10, 20, 30, 60, 90, 120 y 180 min y se mezclaron con etanol al 50 % (1 mL). Estas soluciones se centrifugaron a  $800 \times g$  (10 min) y se determinó el contenido de glucosa hidrolizada del sobrenadante utilizando el ensayo de glucosa oxidasa/peroxidasa (Megazyme). El porcentaje de hidrólisis de almidón total se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ hidrólisis} = \left( \frac{\text{peso de glucosa liberada} \times 160/182}{\text{Peso de almidón total en harina o almidón}} \right) \times 100 \quad (1)$$

## 2.6 Determinación de las propiedades térmicas

Se estudiaron las variables térmicas (temperatura de inicio de gelatinización =  $T_i$ , temperatura de gelatinización =  $T_g$ , temperatura final de gelatinización =  $T_f$ , entalpía de gelatinización =  $\Delta H$ ) por calorimetría diferencial de barrido (CDB) de las harinas y almidones utilizando un calorímetro diferencial de barrido modelo 2010 (TA Instruments, Inc. New Castle, USA), para lo cual se empleó el método propuesto por Paredes-López y col. (1994), el cual consistió en mezclar 2 mg de la muestra con 7  $\mu\text{L}$  de agua desionizada en una charola de aluminio (la determinación se hizo al menos por triplicado).

## 2.7 Evaluación de la viscosidad aparente

La viscosidad aparente se determinó mediante un reómetro AR1500ex (TA Instruments, New Castle, DE, EUA) el cual se equipó con la geometría de placas paralelas de acero inoxidable ( $\theta = 60 \text{ mm}$ ) adaptado con el sistema Peltier para el control de la temperatura a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . El sistema de placas se cubrió con aceite mineral para evitar la evaporación del agua durante la prueba. Se utilizó un gap de  $500 \mu\text{m}$  entre las placas, la cantidad de muestra utilizada fue de 1.5 mL a la concentración de 5 % (p/v) de sólidos totales en agua destilada. La viscosidad aparente ( $\eta_{ap}$ ) se determinó en función del incremento de la velocidad de corte ( $\gamma$ ) de 10 a  $600 \text{ s}^{-1}$  y observando el esfuerzo cortante ( $\tau$ ). Las curvas se ajustaron utilizando el modelo reológico de Ostwald-de Wael también conocido como la Ley de Potencia:  $\tau = k\gamma^n$ ; donde:  $\tau$  = Esfuerzo cortante (Pa),  $\gamma$  = Velocidad de corte ó deformación ( $\text{s}^{-1}$ ),  $k$  = Índice de consistencia ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ),  $n$  = Índice de comportamiento de flujo (adimensional) (Steffe, 1992; Tecante y Doublier, 1999).

## 2.8 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Se realizó un análisis morfológico de MEB en las harinas y almidones aislados de las diferentes variedades de avena. Para lo cual se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL (modelo JSM5800 LV, Japón). Las condiciones de operación fueron 10 kV como voltaje de aceleración y la señal de electrones secundarios. Las muestras se adhirieron con cinta de grafito de doble cara de forma individual en portamuestras de cobre, se cubrieron con una película delgada de oro para hacerlas conductoras al haz de electrones y finalmente se introdujeron a la cámara del microscopio para su observación.

## 2.9 Propiedades funcionales

### 2.9.1 Poder de hinchamiento y solubilidad

El poder de hinchamiento de los almidones y harinas se determinó utilizando el método reportado por Subramanian y col. (1994) con algunas modificaciones, para lo cual se utilizó 0.1 g (bs) de muestra y se mezcló con 2 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada por 4 h a diferentes temperaturas. Las temperaturas fueron 40, 50, 60 y  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  respectivamente. La mezcla se centrifugó a 15,000 rpm por 15 min, el sobrenadante se decantó y el sedimento del almidón húmedo se pesó. El poder de hinchamiento se definió como la relación del peso del sedimento húmedo y peso inicial del almidón seco. El solvente del sobrenadante fue evaporado a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por 4 h. El índice de solubilidad se determinó como la relación del peso del sobrenadante seco al peso inicial del almidón seco.

### 2.9.2 Estabilidad al congelamiento/deshielo

La estabilidad al congelamiento/deshielo se determinó a través del método reportado por Varavinit y col. (2000) con modificaciones. Se mezclaron de 30 g de almidón (peso seco) con 470 gr de agua y se gelatinizaron en un visco amilógrafo Brabender desde  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  a una velocidad de  $1.5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  y se mantuvo esta temperatura durante 15 min antes de enfriar a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  a una velocidad de  $1.5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ . Se añadieron 25 g de la pasta de almidón en tubos de centrifuga y se dejaron enfriar a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . La pasta de almidón se congeló a  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  en un ultracongelador (VWR Brand, VWR Scientific Products, Ohio, USA) durante 22 h. Todos los tubos se sacaron y se descongelaron bajo diversas condiciones. Cinco tubos se descongelaron para cada condición,

estas condiciones fueron las siguientes: a) 30 °C en un baño maría durante 1 h; b) 60 °C en un baño maría durante 30 min, después a 30 °C durante otros 30 min; c) 75 °C en un baño maría durante 30 min y después a 30 °C durante 30 min; d) 90 °C en un baño maría durante 30 min y después a 30 °C durante 30 min. Una muestra de cada condición de descongelación se centrifugó a 1,200 × g durante 15 min. El líquido claro se decantó y se pesó el residuo. El porcentaje de sinéresis se calculó como la relación entre el peso del líquido decantado y el peso total de la pasta antes de la centrifugación, multiplicado por 100.

## 2.10 Análisis estadístico

Los experimentos se realizaron empleando un diseño completamente aleatorizado. Se utilizó un análisis de varianza (AdeVA,  $P \leq 0.05$ ) usando el programa estadístico Sigma-Stat, versión 2.03 (Fox y col., 1995). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ; (Walpole y col., 1999). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ; Walpole y col., 1999).

## 3 Resultados y discusión

### 3.1 Análisis químico proximal

Se obtuvieron rendimientos de almidón que oscilaron desde 55.2 hasta 63.5 % (en base seca) para las variedades Teporaca y Bachíniva, respectivamente, sin que se observaran diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre esta última y la variedad Cuauhtémoc (Tabla 1). Estos porcentajes de rendimiento en la obtención de almidón a partir de la cantidad de material inicial de cereal son similares a los reportados para otras variedades experimentales de avena (Liu y col., 2010) y ligeramente superiores a los valores reportados por Givens y col. (2004) en dos variedades de avenas cultivadas en Inglaterra.

El contenido de humedad osciló desde 3.5 hasta 10.6 % para los almidones de las variedades Bachíniva y Teporaca, presentando diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre estos almidones y la variedad Cuauhtémoc (8.8 %). Hoover y Vasanthan (1993) reportaron un contenido de humedad similar (9.4 %) en muestras de almidón de avena canadiense de la variedad AC Hill. Valores similares de humedad ( $\approx 10$  %) han sido reportados en muestras de almidón de arroz de diferentes variedades (Patindol y Wang, 2002). Las variaciones en el contenido de humedad

de los almidones dependen de la humedad relativa ambiental en la cual se almacenan (Aboubakar y col., 2008; Swinkels, 1985) y de su capacidad de absorción de humedad, la cual está a su vez directamente relacionada con su carácter hidrofílico y su cristalinidad (Nuñez-Santiago y col., 2011; Rivas-González y col., 2009; Zamudio-Flores y Bello-Pérez, 2013).

El contenido de  $\beta$ -glucanos osciló entre 3.5 a 4.3 % (cv Bachíniva y cv Teporaca) sin que se observaran diferencias significativas entre las diversas variedades. Estos valores son similares a los reportados por Kim y White (2012) en las variedades típicas de avenas “Jim” y “Paul” (4.0 y 5.3 % de  $\beta$ -glucanos, respectivamente). Con respecto al contenido de almidón total se obtuvo un porcentaje que varió desde 83 % hasta 87 %, sin que se observaran diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre los almidones de las distintas variedades. Los contenidos inferiores al 100 % en almidón total indicaron la presencia de otros componentes como son la fibra, lípidos y algunas proteínas.

Se observaron altos contenidos de lípidos, proteínas, cenizas y fibra dietaria total en el almidón y la harina de la variedad Bachíniva, los cuales fueron significativamente superiores ( $P < 0.05$ ) en comparación con los almidones Teporaca y Cuauhtémoc, siendo este último mayor en cuanto a la determinación de almidón total. Los resultados de estas determinaciones son ligeramente mayores a los reportados por Hoover y Senanayake (1996) en almidones de avena de las variedades AC Stewart (*Avena sativa* L.) y NO 735-2 (*Avena nuda* L.). En términos generales las variaciones entre los diversos componentes dependen de varios factores, dentro de los cuales está la variedad, condiciones agronómicas, tipo de suelos, fertilización y riego (Martínez y col., 2010).

### 3.2 Digestibilidad *in vitro*

Los resultados de la digestibilidad *in vitro* de las harinas y almidones de las diferentes variedades de avena se pueden observar en la Fig. 1. En términos generales la hidrólisis de las harinas, almidones y el pan blanco (control) incrementó cuando aumentó el tiempo de digestión, lo cual es congruente con lo reportado recientemente por Kim y White (2012) en dos muestras de harinas y almidones de avena con concentraciones típicas de  $\beta$ -glucanos (variedades “Jim” y “Paul”) y dos variedades desarrolladas experimentalmente en la Universidad Estatal de Iowa con concentraciones altas de  $\beta$ -glucanos (variedades

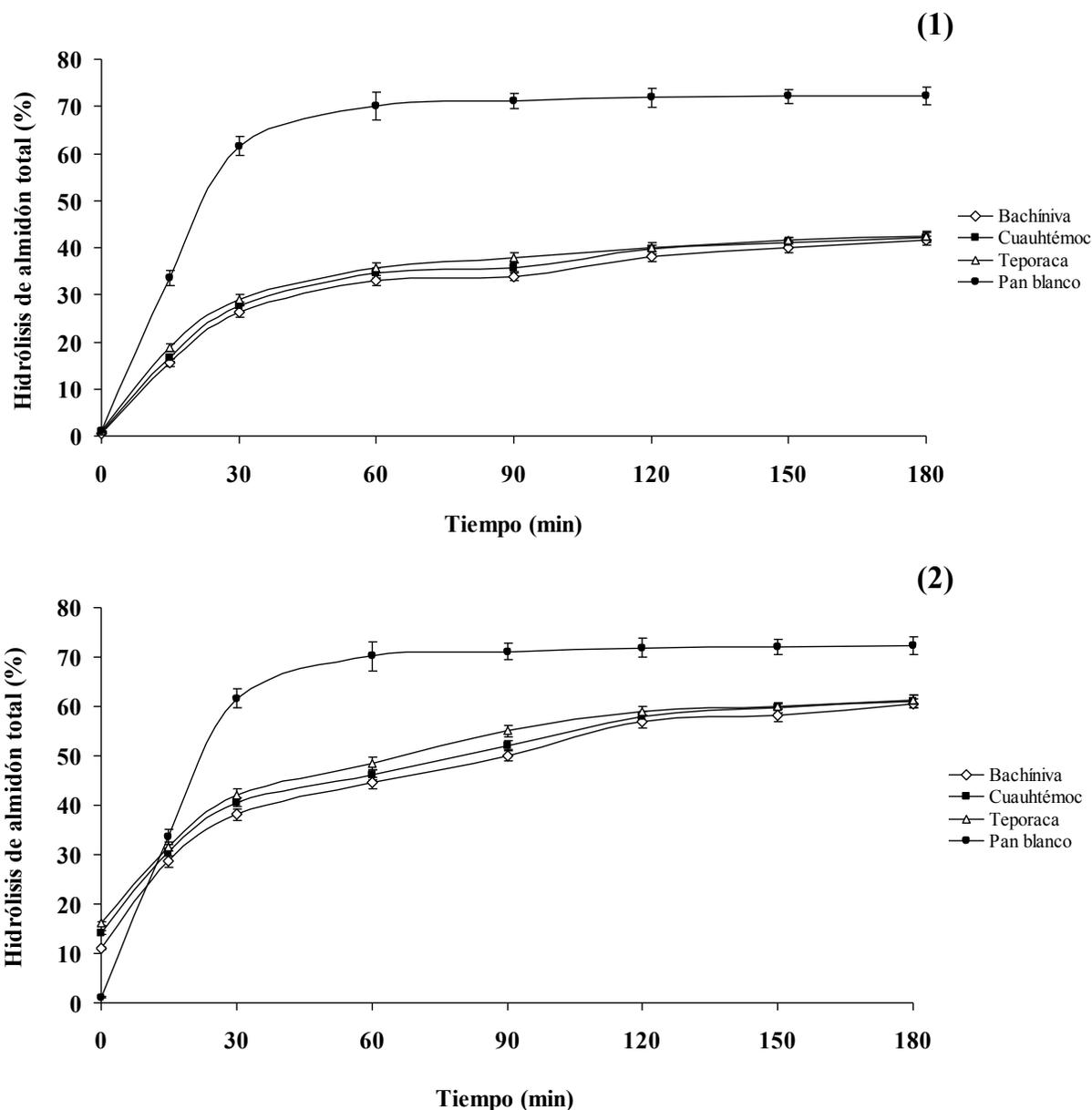


Fig. 1. Digestibilidad *in vitro* de las harinas (1) y almidones (2).

IA95111 y N979-5-4), las cuales se analizaron en crudo y sometidas a calentamiento (10 min; relación 1:8, harina:agua). Las harinas y almidones presentaron el siguiente comportamiento: Teporaca > Cuauhtémoc > Bachíniva; sin embargo, no se observaron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre las variedades siendo la velocidad de hidrólisis  $\approx 31\%$  mayor en los almidones que en sus respectivas harinas, debido a que los primeros presentaron un valor de 61 % y las harinas 42 % al tiempo de 180 min. La diferencia puede ser atribuida a la presencia de

compuestos como la fibra presentes en la harina (Tabla 1) que pudieron interferir y obstaculizar la actividad de la enzima con el sustrato (almidón). Diversos investigadores han argumentado que la presencia de ciertos compuestos como los  $\beta$ -glucanos, lípidos y proteínas presentes en la fibra soluble pueden interferir y disminuir la velocidad y el porcentaje de hidrólisis de harinas de diversas fuentes botánicas (Ajithkumar y col., 2005; Björck y col., 1994; Hoover y Zhou, 2003). En este mismo sentido, Wood (1994) reportó que los  $\beta$ -glucanos de la avena al absorber una mayor cantidad

Tabla 1. Análisis químico proximal (%) realizado a las harinas y almidones de las diferentes variedades de avena\*.

Análisis	Muestra					
	Bachíniva		Cuauhtémoc		Teporaca	
	Harina	Almidón	Harina	Almidón	Harina	Almidón
Rendimiento <sup>¶</sup>	89.63 ± 2.05 <sup>A</sup>	63.50 ± 2.15 <sup>a</sup>	87.32 ± 1.50 <sup>A</sup>	59.10 ± 3.20 <sup>a</sup>	88.17 ± 3.60 <sup>A</sup>	55.18 ± 1.35 <sup>b</sup>
Lípidos	9.05 ± 2.60 <sup>A</sup>	8.00 ± 0.20 <sup>a</sup>	3.35 ± 1.80 <sup>B</sup>	2.50 ± 0.50 <sup>b</sup>	2.05 ± 1.36 <sup>B</sup>	1.89 ± 0.03 <sup>b</sup>
Proteínas <sup>**</sup>	7.55 ± 1.30 <sup>A</sup>	6.40 ± 0.20 <sup>a</sup>	2.25 ± 0.85 <sup>B</sup>	1.20 ± 0.20 <sup>b</sup>	1.85 ± 0.95 <sup>B</sup>	1.10 ± 0.14 <sup>b</sup>
Cenizas	2.75 ± 0.85 <sup>A</sup>	1.20 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.05 <sup>B</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.10 ± 0.25 <sup>B</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>c</sup>
Fibra dietaria total	8.63 ± 1.10 <sup>A</sup>	4.03 ± 0.08 <sup>a</sup>	3.50 ± 0.98 <sup>B</sup>	1.60 ± 0.25 <sup>b</sup>	3.68 ± 0.55 <sup>B</sup>	2.06 ± 0.33 <sup>c</sup>
β-glucanos	3.45 ± 0.40 <sup>A</sup>	ND	3.80 ± 0.61 <sup>a</sup>	ND	4.35 ± 0.85 <sup>a</sup>	ND
Humedad	4.05 ± 0.85 <sup>A</sup>	3.50 ± 0.10 <sup>a</sup>	9.20 ± 1.17 <sup>B</sup>	8.75 ± 1.15 <sup>b</sup>	10.15 ± 0.95 <sup>B</sup>	10.58 ± 0.28 <sup>c</sup>
Almidón total	59.68 ± 1.25 <sup>A</sup>	83.20 ± 1.50 <sup>a</sup>	65.33 ± 2.00 <sup>B</sup>	87.20 ± 2.35 <sup>a</sup>	60.45 ± 1.20 <sup>A</sup>	85.00 ± 1.10 <sup>a</sup>
Almidón resistente	ND	0.10 ± 0.03 <sup>a</sup>	ND	0.48 ± 0.01 <sup>b</sup>	ND	0.53 ± 0.10 <sup>c</sup>
Amilosa aparente	ND	27.12 ± 1.15 <sup>a</sup>	ND	26.55 ± 2.10 <sup>a</sup>	ND	26.80 ± 1.50 <sup>a</sup>

\*Media aritmética de tres repeticiones ± error estándar. Valores promedio con la misma letra minúscula o mayúscula en cada fila no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ). Valores en porcentaje en base seca. \*\*Cuantificado por el método Kjendahl. Factor de conversión de  $N_2 = 6.25$ . <sup>¶</sup>Expresado en % de material inicial. ND = No determinado.

Tabla 2. Variables térmicas obtenidas por calorimetría diferencial de barrido (CDB) de las muestras de harinas y almidones de las diferentes variedades de avena\*.

Muestra	Variables térmicas			
	$T_i$	$T_g$	$T_f$	$\Delta H$ (J/g)
Harina Bachíniva	55.50 ± 0.95 <sup>a</sup>	60.11 ± 0.85 <sup>a,b</sup>	64.35 ± 0.90 <sup>a</sup>	7.77 ± 0.85 <sup>a</sup>
Harina Cuauhtémoc	57.05 ± 0.45 <sup>a,b</sup>	61.90 ± 0.58 <sup>b</sup>	67.08 ± 0.85 <sup>b</sup>	8.25 ± 0.81 <sup>b</sup>
Harina Teporaca	58.10 ± 0.60 <sup>b</sup>	63.84 ± 0.25 <sup>c</sup>	68.10 ± 0.75 <sup>b</sup>	6.67 ± 0.78 <sup>a</sup>
Almidón Bachíniva	55.20 ± 1.12 <sup>a</sup>	59.65 ± 1.10 <sup>a</sup>	64.20 ± 1.15 <sup>a</sup>	7.65 ± 1.10 <sup>a</sup>
Almidón Cuauhtémoc	56.78 ± 0.50 <sup>a</sup>	61.85 ± 0.93 <sup>b</sup>	66.70 ± 1.20 <sup>b</sup>	8.10 ± 0.99 <sup>b</sup>
Almidón Teporaca	57.60 ± 0.80 <sup>b</sup>	63.20 ± 0.50 <sup>c</sup>	67.50 ± 0.66 <sup>b</sup>	6.30 ± 0.50 <sup>a</sup>

\*Media aritmética de cinco repeticiones ± error estándar. Valores promedio con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ).  $T_i$  = temperatura de inicio de gelatinización;  $T_g$  = temperatura de gelatinización;  $T_f$  = temperatura final de gelatinización;  $\Delta H$  = entalpía de gelatinización.

de agua disminuyen la movilidad de las enzimas, lo cual repercute en la velocidad de hidrólisis. Chung y col. (2008) argumentaron que la enzima accede con mayor rapidez cuando el almidón está hinchado debido a la absorción de agua. En tal situación, los almidones presentaron una mayor capacidad de hidratación al tener una mayor cantidad de agua disponible en comparación con las harinas.

### 3.3 Análisis térmico

El almidón Bachíniva presentó valores menores de  $T_i$  y  $T_f$  (55.2 °C y 64.2 °C) y el almidón de la cv Teporaca mostró los valores mayores de estas variables térmicas (57.6 °C y 67.5 °C); mientras que el almidón de la cv Cuauhtémoc presentó valores intermedios para  $T_i$

y  $T_f$  (56.8 °C y 66.7 °C) (Tabla 2). El valor de  $\Delta H$  osciló desde 6.3 J g<sup>-1</sup> (cv Teporaca) hasta 8.10 J g<sup>-1</sup> (cv Cuauhtémoc). Los resultados de  $T_i$  y  $T_f$  son comparativamente similares a los reportados por Tester y Karkalas (1996) en un estudio realizado en muestras de almidones de seis variedades de avenas de origen alemán.

El valor obtenido de la temperatura de gelatinización ( $T_g$ ) en los almidones de las tres variedades fue significativamente diferente entre ellas ( $P < 0.05$ ) indicando diferencias estructurales que pueden ser atribuidas a los diversos grados de cristalinidad (Casarrubias-Castillo y col., 2012). Se ha reportado que la  $T_g$  de los almidones es una medida de la perfección de los cristales mientras que la entalpía es una medida del grado de cristalinidad

(Tester y Karkalas, 1996; Tester y Morrison, 1990). En términos generales, las harinas presentaron un comportamiento térmico similar al de sus respectivos almidones, esto se debió a que los componentes minoritarios no interfirieron de manera significativa en las variables térmicas  $T_i$ ,  $T_g$ ,  $T_f$ , y  $\Delta H$ . Esto es congruente en el sentido de que el componente mayoritario de todas las harinas fue el almidón (Tabla 1), por lo que las variables térmicas están en función de las propiedades fisicoquímicas de la gelatinización que sucedió en los almidones. Noda y col. (1998) fundamentan que la temperatura de gelatinización es influenciada por la estructura molecular de la región cristalina la cual se debe a la distribución de las cadenas de amilopectina y no a la proporción de regiones cristalinas.

### 3.4 Propiedades reológicas

Los almidones y sus respectivas harinas de las diferentes variedades presentaron un índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) menor a 1, por lo cual su comportamiento se definió como no-Newtoniano del tipo corte adelgazante o “pseudoplástico” (Tabla 3) (Steffe, 1992). Se observó que el valor  $n$  fue disminuyendo en el siguiente orden: “Teporaca” > “Bachíniva” > “Cuauhtémoc” en los almidones mientras que en las harinas no se presentaron cambios significativos entre las diversas variedades de avenas. La presencia de otros componentes como son los  $\beta$ -glucanos presentes en la fibra dietaria pudieron interferir en los valores de  $n$  (Berski y col., 2011). Recientemente, diversos investigadores han reportado la importancia que ejercen los componentes individuales y sus posibles interacciones en las

variables reológicas de almidones de avenas de diferentes variedades (Berski y col., 2011; Galdeano y col., 2009; Liu y col., 2010).

En términos generales, la viscosidad aparente fue en el orden siguiente: almidón cv Bachíniva (2.25 Pa.s) > Cuauhtémoc (1.50 Pa.s) > Teporaca (0.90 Pa.s) y este mismo comportamiento se observó en sus respectivas harinas; mientras que la variable  $k$ , siguió un comportamiento diferente, siendo el almidón cv Cuauhtémoc el que presentó el mayor valor y el almidón cv Bachíniva el menor, sin que se observaran diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre las harinas de las diferentes variedades. Se ha reportado además, que existen ciertas interacciones entre los componentes de  $\beta$ -glucanos, almidón, proteínas y lípidos lo cual se observó en las propiedades de formación de pastas en harinas de otros cereales como el maíz y el trigo (Ayadi y col., 2011; Habeych y col., 2008; Rodriguez-Gonzalez y col., 2004; Schweizer y Reimann, 1986).

### 3.5 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

En las Figs. 2 y 3 se observan los resultados de microscopia electrónica de barrido (MEB) realizados a las muestras de harinas y almidones de las diferentes variedades. En todas las muestras se observaron diferentes formas de gránulos y tamaños los cuales oscilaron desde  $2 \mu\text{m}$  hasta  $10 \mu\text{m}$ . Algunos gránulos de almidón presentaron forma poliédrica mientras que otros fueron ovalados o hemisféricos y están asociados en forma de racimos, lo que cual es característico de este tipo de almidón (Zhou y col., 1998).

Tabla 3. Variables reológicas de índice de consistencia ( $k$ ), índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) y bondad del ajuste ( $R^2$ ) del modelo de Ley de Potencia evaluadas a  $600 \text{ s}^{-1}$  de las muestras de almidones y harinas de las diferentes variedades de avena\*.

Muestra	Variables reológicas			$R^2$
	$\eta_{ap}$ (Pa.s)	$k$ (Pa.s <sup><math>n</math></sup> )	$n$ (adimensional)	
Harina Bachíniva	$2.15 \pm 0.25^a$	$2.15 \pm 0.35^c$	$0.95 \pm 0.10^c$	0.990
Harina Cuauhtémoc	$1.41 \pm 0.27^b$	$2.45 \pm 0.21^c$	$0.96 \pm 0.11^c$	0.981
Harina Teporaca	$0.95 \pm 0.47^c$	$2.20 \pm 0.15^c$	$0.96 \pm 0.08^c$	0.987
Almidón Bachíniva	$2.25 \pm 0.50^a$	$1.12 \pm 0.20^a$	$0.78 \pm 0.01^a$	0.985
Almidón Cuauhtémoc	$1.50 \pm 0.10^b$	$1.85 \pm 0.15^b$	$0.65 \pm 0.12^b$	0.981
Almidón Teporaca	$0.90 \pm 0.20^c$	$1.25 \pm 0.11^a$	$0.91 \pm 0.15^c$	0.991

\*Media aritmética de cinco repeticiones  $\pm$  error estándar. Valores promedio con la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ).

En las micrografías se observó la presencia de gránulos pequeños con forma poligonal lo cual se pudo deber a que durante la molienda del almidón se ejerció esfuerzo de cizalla o corte (provocado por la licuadora) lo cual ocasionó ruptura en los gránulos del almidón. La diferencia en tamaño se debió a la

fuerza botánica del cual procedieron, ya que diversos investigadores han reportado que el cereal de avena presenta una heterogeneidad en la distribución de tamaños de gránulos de almidón (BeMiller y Whistler, 2003; Hoover y Vasanthan, 1993; Jane y col., 1994; Paton, 1977).

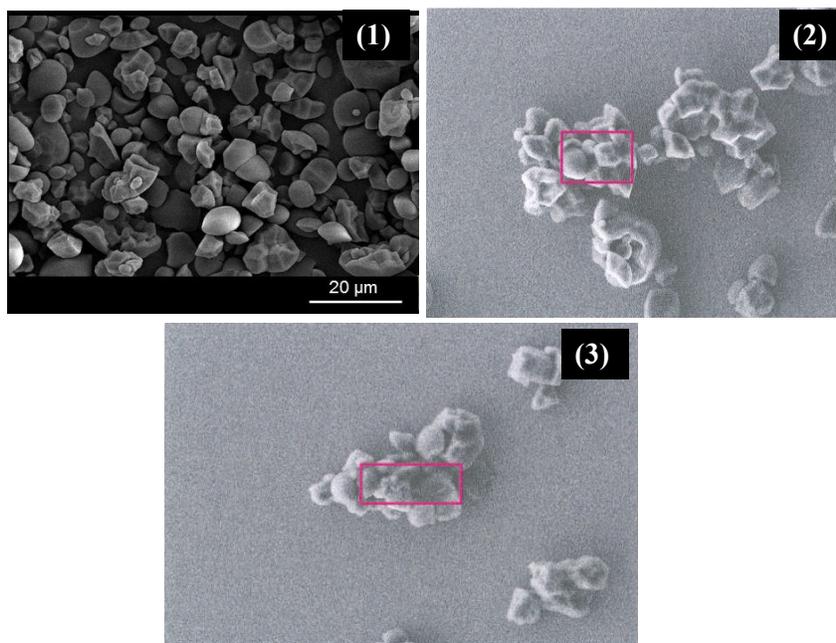


Fig. 2. Micrografías en MEB por electrones secundarios de las muestras de harinas: (1) Bachíniva, (2) Teporaca y (3) Cuauhtémoc a 500X (superior) y 1500X (inferior).

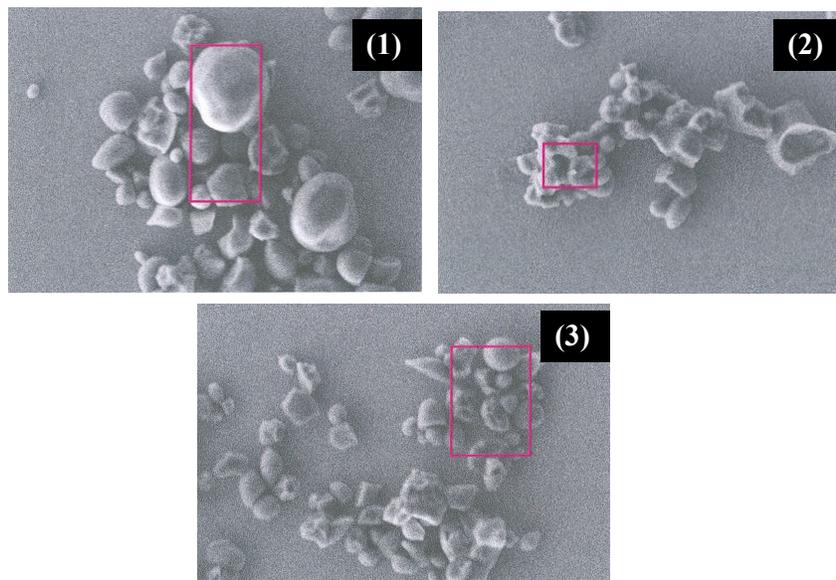


Fig. 3. Micrografías en MEB por electrones secundarios de las muestras de almidones: (1) Bachíniva, (2) Teporaca y (3) Cuauhtémoc a 500X (superior) y 1500X (inferior).

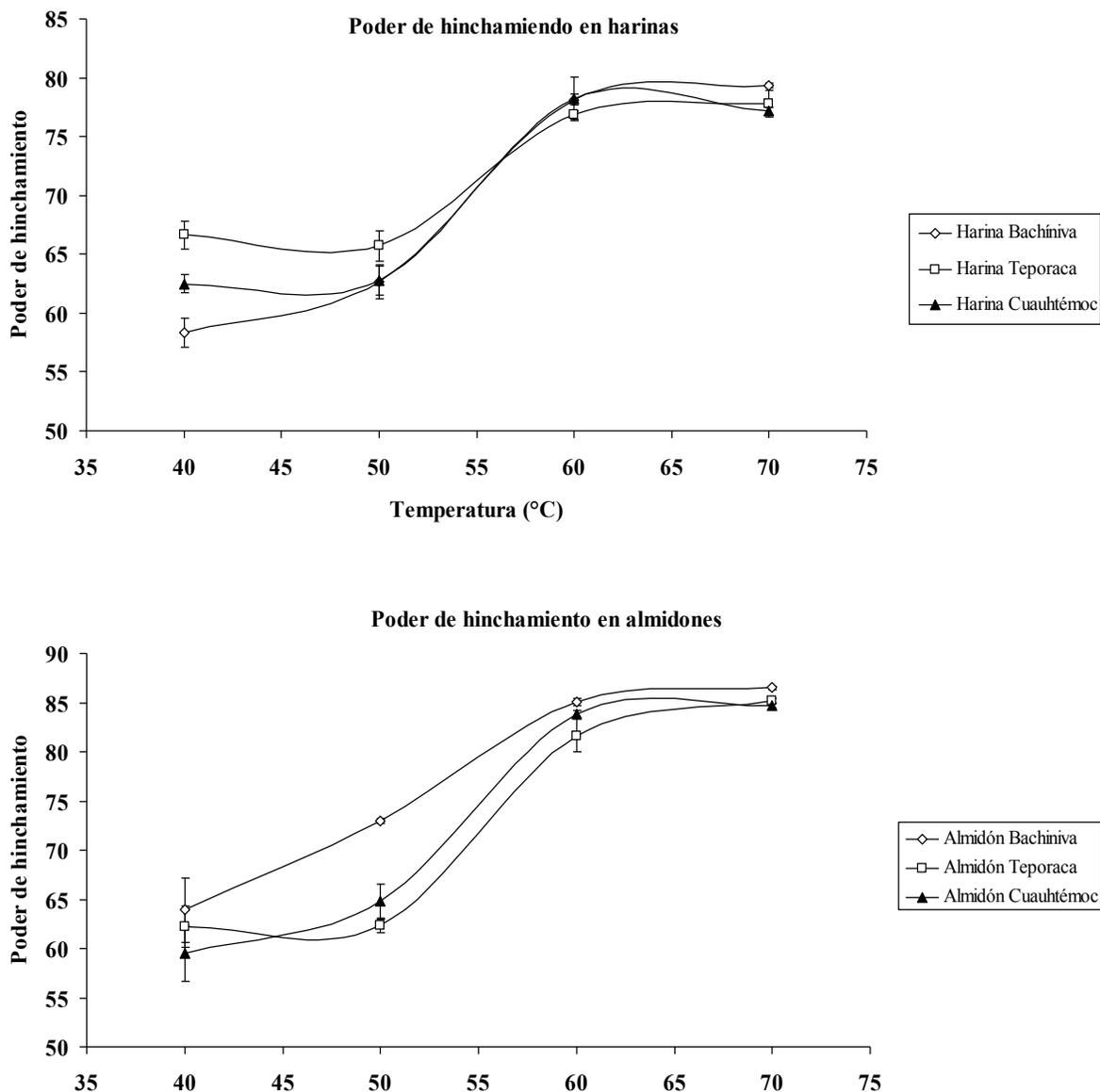


Fig. 4. Poder de hinchamiento (g/g) de las muestras de harinas y almidones de las diferentes variedades de avenas.

### 3.6 Propiedades funcionales

#### 3.6.1 Poder de hinchamiento y solubilidad

El resultado del poder de hinchamiento de las harinas y almidones de las diferentes variedades de avenas se observa en la Fig. 4. En las harinas se mostraron diferencias significativas en la temperatura inicial de 40 °C, mientras que en los almidones no se observaron estas diferencias sino hasta la temperatura de 50 °C y únicamente en el almidón de la avena Bachíniva lo cual se mantuvo durante las temperaturas superiores (60 y 70 °C). Estas diferencias encontradas en el valor

del poder de hinchamiento para la muestra del almidón Bachíniva no se observaron para el caso de las harinas. En la temperatura inicial (40 °C) se observaron valores superiores para las muestras de harinas (Teporaca = 66.6 > Cuauhtémoc = 62.5 > Bachíniva = 58.3 g/g) en comparación con las muestras de almidones (Bachíniva = 63.9 > Teporaca = 62.3 > Cuauhtémoc = 59.5 g/g).

Estos valores superiores en el poder de hinchamiento de las harinas están relacionados con su capacidad de absorción de agua, los cuales pueden ser debidos a la presencia de una gran cantidad de

residuos de aminoácidos polares de las proteínas, los cuales tienen afinidad por las moléculas de agua (Andrade-Mahecha y col., 2012; Yusuf y col., 2008). En el intervalo de 55-60 °C los valores incrementaron significativamente ( $P < 0.05$ ) en las muestras de harinas y almidones de las diferentes variedades, posteriormente, a temperaturas mayores (70 °C) se mantuvieron prácticamente sin ningún incremento significativo. Estos resultados son comparativamente mayores a los reportados por Singh y col. (2006) quienes reportaron que el comportamiento de hinchamiento estuvo correlacionado principalmente con el contenido de amilopectina, mientras que la amilosa actúa como un inhibidor del poder de hinchamiento en muestras de almidones aislados de 19 diferentes cultivares de arroz *indica*.

Yu y col. (2012) reportaron que existen otros factores que pueden influir en el poder de hinchamiento. Por ejemplo, el poder de hinchamiento del almidón depende de la capacidad de las moléculas para retener agua por medio de los enlaces de hidrógeno, debido a que cuando los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de almidón se rompieron después de una gelatinización completa, estos se reemplazaron por enlaces de hidrógeno con el

agua (Lee y Osman, 1991). Con respecto al porcentaje de solubilidad (Fig. 5) a la temperatura inicial (40 °C) no se observaron diferencias significativas entre las muestras de almidones de las diferentes variedades ni entre las harinas de las variedades Cuauhtémoc y Teporaca (con valores que oscilaron desde 0.7 hasta 1.5 % aproximadamente); sin embargo, en la harina de la cv Bachíniva se observó un incremento significativo ( $P < 0.05$ ) de alrededor de 10 veces (7 %) los valores de las muestras de las otras harinas (1 %). De acuerdo con Ogawa y col. (2003) y Pelissari y col. (2012) la presencia de proteínas y lípidos pueden influir en la permeación de agua durante el proceso de gelatinización, siendo este último componente (lípidos) mayoritario en la cv Bachíniva (Tabla 1).

En todas las muestras a excepción de la harina cv Bachíniva se observó un incremento en el % solubilidad a la temperatura de 60 °C, sin que se observaran diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) con la temperatura superior (70 °C). Este incremento está relacionado con la temperatura de gelatinización del almidón que contienen las harinas y dicho propiamente, los almidones de las diferentes variedades de avenas (Bello-Pérez y col., 1999; Pelissari y col., 2012).

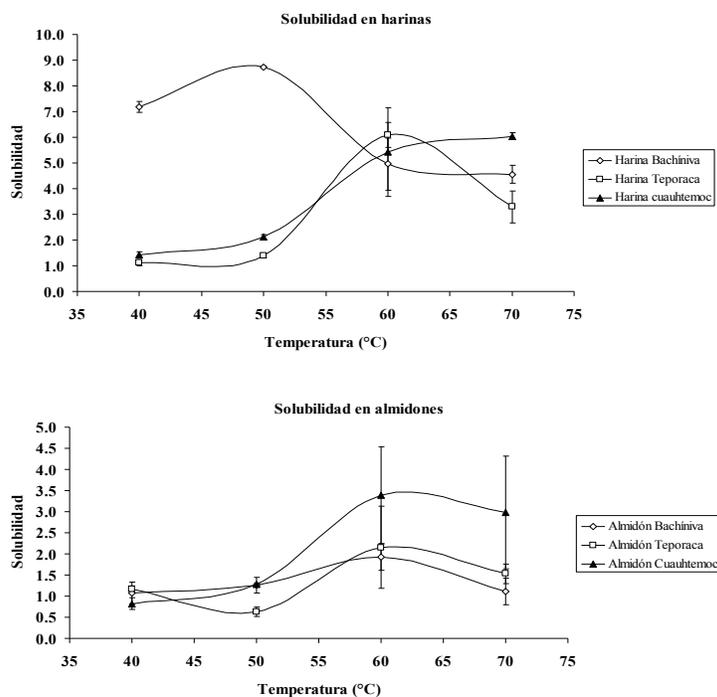


Fig. 5. Solubilidad (%) de las muestras de harinas y almidones de las diferentes variedades de avenas.

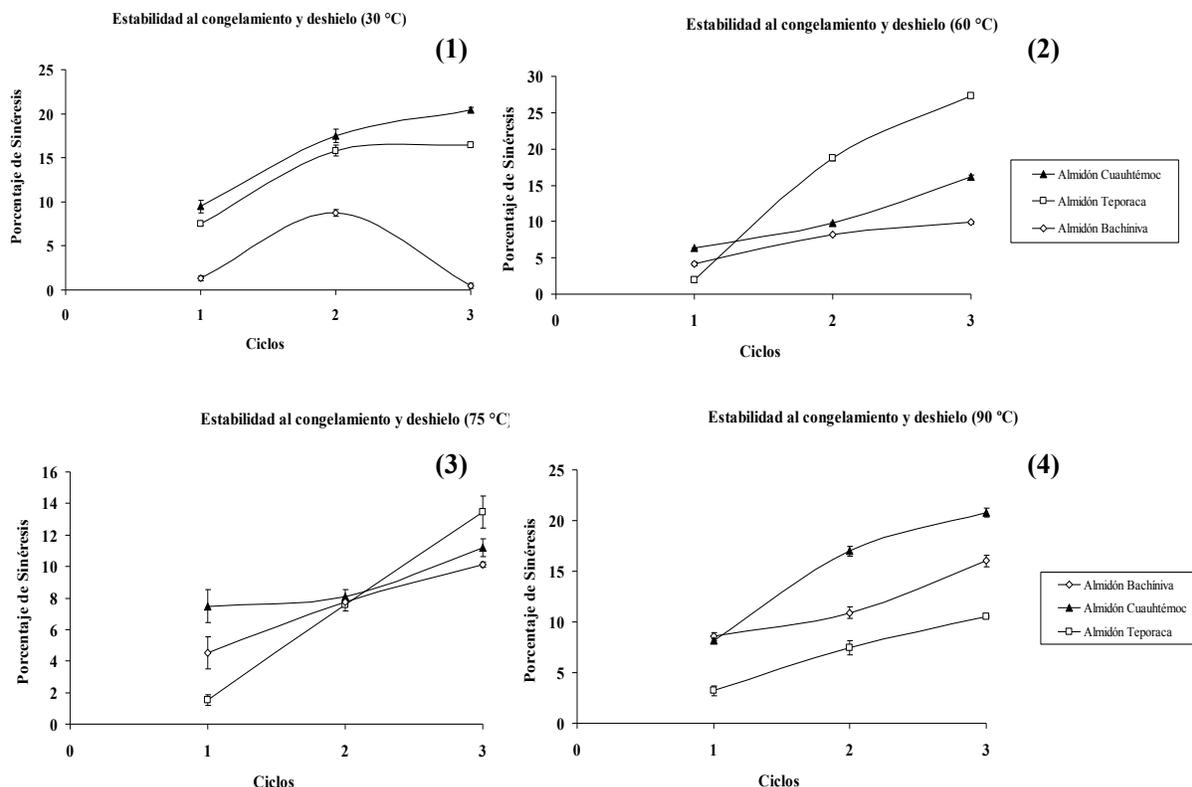


Fig. 6. Estabilidad al congelamiento-deshielo de los almidones a la temperatura de: 30 °C (1), 60 °C (2), 75 °C (3) y 90 °C (4)

### 3.6.1 Estabilidad al congelamiento/deshielo

En la Fig. 6 se observan los resultados de la prueba de estabilidad al congelamiento-deshielo de las diferentes variedades de los almidones de avena. Como se puede apreciar, en las muestras se observó un mayor porcentaje de sinéresis (separación) cuando incrementaron los ciclos de congelamiento-deshielo (a excepción del almidón cv. Bachíniva a la temperatura de 30 °C), comportamiento similar al reportado por (Varavinit y col., 2000) en muestras de almidones de sago y tapioca sometidas a ciclos de congelamiento-deshielo a temperaturas de 30, 60 y 90 °C. De las muestras analizadas, el almidón cv. Teporaca presentó el mayor porcentaje de sinéresis ( $\approx 25\%$ ) al tercer ciclo de congelamiento-deshielo; mientras que la muestra de almidón cv. Bachíniva presentó el menor valor ( $\approx 1\%$ ) lo cual indicó que esta muestra fue la que mayor estabilidad mostró a la temperatura de 30 °C.

Arunyanart y Charoenrein (2008) reportaron un alto valor de sinéresis (55 %) en geles de almidón de arroz después del primer ciclo de congelamiento-deshielo y mostraron poco cambio en los subsecuentes

ciclos. Las diferencias encontradas en este estudio, se deben al método de medición y los tipos de almidón utilizados en cada experimento (Arunyanart y Charoenrein, 2008). La determinación del porcentaje de sinéresis en los geles de almidón aplicando ciclos de congelamiento-deshielo es utilizada para evaluar la capacidad del almidón para resistir los cambios físicos indeseables los cuales ocurren durante el congelamiento-deshielo (Charoenrein y col., 2011). De acuerdo con Saartrat y col. (2005) y Morris (1990) citados por Charoenrein y col. (2011) la sinéresis en un gel sometido al congelamiento-deshielo es causada por un incremento en las asociaciones moleculares entre las cadenas de almidón, en particular de la retrogradación de la amilosa lo cual resulta en una expulsión del agua en la estructura del gel.

## Conclusiones

La digestibilidad *in vitro* fue mayor en los almidones que en sus respectivas harinas y siguió el siguiente orden descendente cv Cuauhtémoc > Teporaca

> Bachíniva. Las variables térmicas indicaron un mayor orden cristalino en la muestra cv Cuauhtémoc en comparación con las otras variedades. Las propiedades funcionales indicaron además, un diferente arreglo estructural debido a que el almidón Teporaca presentó el mayor porcentaje de sinéresis ( $\approx 25\%$ ) al tercer ciclo de congelamiento-deshielo; mientras que la muestra de almidón Bachíniva presentó el menor valor ( $\approx 1\%$ ). Estas variedades podrían encontrar alguna aplicación práctica en diversos sistemas alimenticios y podrían ser una potencial fuente de alimentación para personas con desórdenes alimenticios (enfermos celíacos).

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Arturo Ramos Martínez por su asistencia técnica. Los autores (JMTG y JGMM) agradecen la beca CONACYT. Se agradece además al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Chihuahua por financiar el presente trabajo, el cual forma parte del proyecto titulado: "Obtención de un alimento funcional a partir de almidón resistente por modificación física y química del almidón de avena cultivada en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua", con clave CHIH-2009-C02-126281.

### Referencias

- Aboubakar, Njintang, Y. N., Scher, J. y Mbofung, C. M. F. (2008). Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches. *Journal of Food Engineering* 86, 294-305.
- Ajithkumar, A., Andersson, R. y Åman, P. (2005). Content and molecular weight of extractable  $\beta$ -glucan in American and Swedish oat samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, 1205-1209.
- Alsaffar, A. A. (2010). Effect of thermal processing and storage on digestibility of starch in whole wheat grains. *Journal of Cereal Science* 52, 480-485.
- Andrade-Mahecha, M. M., Tapia-Blácido, D. R. y Menegalli, F. C. (2012). Physical-chemical, thermal, and functional properties of achira (*Canna indica* L.) flour and starch from different geographical origin. *Starch/Stärke* 64, 348-358.
- AOAC (2002). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of Official Analytical Chemist, Gaithersburg, MA, EUA.
- Aravind, N., Sissons, M., Fellows, C. M., Blazek, J. y Gilbert, E. P. (2013). Optimisation of resistant starch II and III levels in durum wheat pasta to reduce *in vitro* digestibility while maintaining processing and sensory characteristics. *Food Chemistry* 136, 1100-1109.
- Arunyanart, T. y Charoenrein, S. (2008). Effect of sucrose on the freeze-thaw stability of rice starch gels: Correlation with microstructure and freezable water. *Carbohydrate Polymers* 74, 514-518.
- Ayadi, F., Bliard, C. y Dole, P. (2011). Materials based on maize biopolymers: Effect of flour components on mechanical and thermal behavior. *Starch/Stärke* 63, 604-615.
- Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Sánchez-Hernández, L. y Paredes-López, O. (1999). Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47, 854-857.
- Bello-Pérez, L. A., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, C., Rodríguez-Ambríz, S. L. y Román-Gutiérrez, A. D. (2010). Effect of the pearly in the isolation and the morphological, physicochemical and rheological characteristics of barley starch. *Carbohydrate Polymers* 81, 63-69.
- BeMiller, J. N. y Whistler, R. L. (2003). Carbohidratos. En: *Química de los Alimentos*, (E. Damodaran, K. Parkin y O. R. Fennema eds.), Pp. 189-267. USA.
- Berski, W., Ptaszek, A., Ptaszek, P., Ziobro, R., Kowalski, G., Grzesik, M. y Achremowicz, B. (2011). Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives. *Carbohydrate Polymers* 83, 665-671.
- Biel, W., Bobko, K. y Maciorowski, R. (2009). Chemical composition and nutritive value of husked and naked oats grain. *Journal of Cereal Science* 49, 413-418.
- Björck, I., Granfeldt, Y., Liljeberg, H., Tovar, J. y Asp, N. G. (1994). Food properties affecting

- the digestion and absorption of carbohydrates. *The American Journal of Clinical Nutrition* 59, 699S-705S.
- Butt, M. S., Tahir-Nadeem, M., Khan, M. K. I., Shabir, R. y Butt, M. S. (2008). Oat: unique among the cereals. *European Journal of Nutrition* 47, 68-79.
- Casarrubias-Castillo, M. G., Méndez-Montevalvo, G., Rodríguez-Ambríz, S. L. M., Sánchez-Rivera, M. y Bello-Pérez, L. A. (2012). Diferencias estructurales y reológicas entre almidones de frutas y cereales. *Agrociencia* 46, 455-466.
- Charoenrein, S., Tatirat, O., Rengsutthi, K. y Thongngam, M. (2011). Effect of konjac glucomannan on syneresis, textural properties and the microstructure of frozen rice starch gels. *Carbohydrate Polymers* 83, 291-296.
- Chung, H. J., Shin, D. H. y Lim, S. T. (2008). *in vitro* starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Research International* 41, 579-585.
- Deckardt, K., Khiaosa-ard, R., Grausgruber, H. y Zebeli, Q. (2014). Evaluation of various chemical and thermal feed processing methods for their potential to enhance resistant starch content in barley grain. *Starch/Stärke* 66, 558-565.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M. y Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition* 46, S33-250.
- Espinosa-Solis, V., Jane, J.-I. y Bello-Pérez, L. A. (2009). Physicochemical characteristics of starches from unripe fruits of mango and banana. *Starch/Stärke* 61, 291-299.
- Fox, E., Shotton, K. y Ulrich, C. (1995). *Sigma-Stat: Manual del usuario, versión 2.1 para Windows 95 NT y 3.1*. Editorial Jandel Scientific Co., EUA.
- Galdeano, M. C., Grossman, M. V. E., Mali, S. y Bello-Pérez, L. A. (2009). Physicochemical properties of IAC 7 oat starch from Brazilian cultivars. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 29, 905-910.
- Givens, D. I., Davies, T. W. y Laverick, R. M. (2004). Effect of variety, nitrogen, fertilizer and various agronomic factors on the nutritive value of husked and naked oats grain. *Animal Feed Science and Technology* 113, 169-181.
- Goñi, I., García-Alonso, A. y Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutritional Research* 17, 427-437.
- Habeych, E., Dekkers, B., van der Goot, A. J. y Boom, R. (2008). Starch-zein blends formed by shear flow. *Chemical Engineering Science* 63, 5229-5238.
- Hartmann, S. y Koehler, P. (2008). Fractionation of cereal flour by sedimentation in non-aqueous systems. I. Development of the method and chemical characterisation of the fractions. *Journal of Cereal Science* 47, 576-586.
- Hoover, R., Hughes, T., Chung, H. J. y Liu, Q. (2010). Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. *Food Research International* 43, 399-413.
- Hoover, R. y Senanayake, S. P. J. N. (1996). Composition and physicochemical properties of oat starches. *Food Research International* 29, 15-26.
- Hoover, R. y Vasanthan, T. (1993). The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. *Journal of Food Biochemistry* 17, 303-325.
- Hoover, R. y Zhou, Y. (2003). *in vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by  $\alpha$ -amylase and resistant starch formation in legumes-A review. *Carbohydrate Polymers* 54, 401-417.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z. y Wu, D. (2004). Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *Journal of Cereal Science* 40, 231-237.
- Hu, X.-P., Xie, Y.-Y., Jin, Z.-Y., Xu, X.-M. y Chen, H.-Q. (2014). Effect of single-, dual-, and triple-retrogradation treatments on *in vitro* digestibility and structural characteristics of waxy wheat starch. *Food Chemistry* 157, 373-379.

- Inglett, G. E., Chen, D., Liu, S. X. y Lee, S. (2014). Pasting and rheological properties of oat products dry-blended with ground chia seeds. *LWT - Food Science and Technology* 55, 148-156.
- Jane, J.-L., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H. y Robyt, J. F. (1994). Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch/Stärke* 46, 121-129.
- Kasemsuwan, T., Jane, J., Schnable, P., Stinard, P. y Robertson, D. (1995). Characterization of dominant mutant amylose-extender (Ael-5180) maize starch. *Cereal Chemistry* 72, 457-464.
- Kim, B.-S., Kim, H.-S., Hong, J.-S., Huber, K. C., Shim, J.-H. y Yoo, S.-H. (2013). Effects of amylsucrase treatment on molecular structure and digestion resistance of pre-gelatinised rice and barley starches. *Food Chemistry* 138, 966-975.
- Kim, H. J. y White, P. J. (2012). *in vitro* Digestion Rate and Estimated Glycemic Index of Oat Flours from Typical and High  $\beta$ -Glucan oat lines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60, 5237-5242.
- Lee, K. Y., Lee, S. y Lee, H. G. (2013). Influence of storage temperature and autoclaving cycles on slowly digestible and resistant starch (RS) formation from partially debranched rice starch. *Starch/Stärke* 65, 694-701.
- Lee, Y. E. y Osman, E. M. (1991). Correlation of morphological changes of rice starch granules with rheological properties during heating in excess water. *Journal of Korean Agricultural Chemical Society* 34, 379-385.
- Liu, Y., Bailey, T. B. y White, P. J. (2010). Individual and interactional effects of  $\beta$ -glucan, starch, and protein on pasting properties of oat flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58, 9198-9203.
- Magaletta, R. L., DiCataldo, S. N., Liu, D., Li, H. L., Borwankar, R. P. y Martini, M. C. (2010). *in vitro* method for predicting glycemic index of foods using simulated digestion and an artificial neutral network. *Cereal Chemistry* 87, 363-369.
- Martínez, M. F., Arelovich, H. M. y Wehrhahne, L. N. (2010). Grain yield, nutrient content and lipid profile of oat genotypes grown in a semiarid environment. *Field Crop Research* 116, 92-100.
- Morris, P. C. y Bryce, J. H. (2000). *Cereal Biotechnology*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Morris, V. J. (1990). Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science & Technology* 1, 2-6.
- Noda, T., Takahata, Y., Sato, T., Suda, I., Morishita, T., Ishiguro, K. y Yamakawa, O. (1998). Relationships between chain length distribution of amylopectin and gelatinization properties within the same botanical origin for sweet potato and buckwheat. *Carbohydrate Polymers* 37, 153-158.
- Nuñez-Santiago, M. C., García-Suárez, F. J., Gutiérrez-Meraz, F., Sánchez-Rivera, M. M. y Bello-Pérez, L. A. (2011). Some intrinsic and extrinsic factors of acetylated starches: Morphological, physicochemical and structural characteristics. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10, 501-512.
- Ogawa, Y., Glenn, G. M., Orts, W. J. y Wood, D. F. (2003). Histological Structures of Cooked Rice Grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51, 7019-7023.
- Paredes-López, O., Bello-Pérez, L. A. y López, M. G. (1994). Amylopectin: structural, gelatinization and retrogradation studies. *Food Chemistry* 50, 411-418.
- Patindol, J. y Wang, Y. J. (2002). Fine structures of starches from long-grain rice cultivars with different functionality. *Cereal Chemistry* 79, 465-469.
- Paton, D. (1977). Oat Starch Part 1. Extraction, Purification and Pasting Properties. *Starch/Stärke* 29, 149-153.
- Pelissari, F. M., Andrade-Mahecha, M. M., Sobral, P. J. d. A. y Menegalli, F. C. (2012). Isolation and characterization of the flour and starch of plantain bananas (*Musa paradisiaca*). *Starch/Stärke* 64, 382-391.
- Regand, A., Chowdhury, Z., Tosh, S. M., Wolever, T. M. S. y Wood, P. (2011). The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility. *Food Chemistry* 129, 297-304.

- Rivas-González, M., Zamudio-Flores, P. B. y Bello-Pérez, L. A. (2009). Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 8, 291-297.
- Rodriguez-Gonzalez, F. J., Ramsay, B. A. y Favis, B. D. (2004). Rheological and thermal properties of thermoplastic starch with high glycerol content. *Carbohydrate Polymers* 58, 139-147.
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V. y Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers* 61, 211-221.
- Salmerón, Z. J. J. (2002). Bachíniva: nueva variedad de avena para temporal con grano de alta calidad industrial. *Agricultura Técnica en México* 28, 85-86.
- Sasaki, T., Kohyama, K., Suzuki, Y., Okamoto, K., Noel, T. R. y Ring, S. G. (2009). Physicochemical characteristics of waxy rice starch influencing the *in vitro* digestibility of a starch gel. *Food Chemistry* 116, 137-142.
- Sáyago-Ayerdi, S. G., Tovar, J., Osorio-Díaz, P., Paredes-López, O. y Bello-Pérez, L. A. (2005). *in vitro* starch digestibility and predicted glycemic index of corn tortilla, black beans, and tortilla-bean mixture: effect of cold storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, 1281-1285.
- Schweizer, T. F. y Reimann, S. (1986). Influence of drum-drying and twin-screw extrusion cooking on wheat carbohydrates. I. A comparison between wheat starch and flours of different extraction. *Journal of Cereal Science* 4, 193-203.
- Shrestha, A. K., Blazek, J., Flanagan, B. M., Dhital, S., Larroque, O., Morell, M. K., Gilbert, E. P. y Gidley, M. J. (2012). Molecular, mesoscopic and microscopic structure evolution during amylase digestion of maize starch granules. *Carbohydrate Polymers* 90, 23-33.
- Singh, N., Kaur, L., Sandhu, K. S., Kaur, J. y Nishinari, K. (2006). Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids* 20, 532-542.
- Steffe, J. F. (1992). *Rheological methods in the food process engineering*. Freeman Press, East Lansing. Michigan.
- Subramanian, V., Hosney, R. C. y Bramel-Cox, P. (1994). Shear thinning properties of sorghum and corn starches. *Cereal Chemistry* 71, 272-275.
- Swinkels, J. M. (1985). Sources of starch its chemistry and physics. En: *Starch Conversion Technology*, (G. M. A. Van Beymun ed.), Pp. 15-46. Marcel Dekkers, New York. USA.
- Takeda, Y., Hizukuri, S. y Juliano, B. O. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research* 168, 79-88.
- Tecante, A. y Doublier, J. L. (1999). Steady flow and viscoelastic behavior of crosslinked waxy corn starch- $\kappa$ -carrageenan pastes and gels. *Carbohydrate Polymers* 40, 221-231.
- Tester, R. F. y Karkalas, J. (1996). Swelling and gelatinization of oat starches. *Cereal Chemistry* 73, 271-277.
- Tester, R. F. y Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starches. *Cereal Chemistry* 67, 558-563.
- van Der Borgh, A., Goesart, H., Veraverbeke, W. S. y Delcour, J. A. (2005). Fractionation of wheat and wheat flour into starch and gluten: overview of the main processes and the factors involved. *Journal of Cereal Science* 41, 221-237.
- Varavinit, S., Anuntavuttikul, S. y Shobsngob, S. (2000). Influence of freezing and thawing techniques on stability of sago and tapioca starch pastes. *Starch/Stärke* 52, 214-217.
- Vasanthan, T. y Bhatta, R. S. (1998). Enhancement of Resistant Starch (RS3) in Amylomaize, Barley, Field Pea and Lentil Starches. *Starch/Stärke* 50, 286-291.
- Walpole, E. R., Myers, H. R. y Myers, L. S. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México.
- Wood, P. J. (1994). Evaluation of oat bran as a soluble fibre source. Characterization of oat  $\beta$ -glucan and its effects on glycaemic response. *Carbohydrate Polymers* 25, 331-336.

- Yu, S., Ma, Y., Menager, L. y Sun, D.-W. (2012). Physicochemical properties of starch and flour from different rice cultivars. *Food and Bioprocess Technology* 5, 626-637.
- Yusuf, A., Ayedun, H. y Sanni, L. (2008). Chemical composition and functional properties of raw and roasted Nigerian benniseed (*Sesamum indicum*) and bambara groundnut (*Vigna subterranean*). *Food Chemistry* 111, 277-282.
- Zamudio-Flores, P. B. y Bello-Pérez, L. A. (2013). Elaboración y caracterización de películas de glicoproteínas obtenidas mediante reacción de Maillard utilizando almidón acetilado y aislado proteico de suero lácteo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12, 401-413.
- Zhang, B., Huang, Q., Luo, F.-x. y Fu, X. (2012). Structural characterizations and digestibility of debranched high-amylose maize starch complexed with lauric acid. *Food Hydrocolloids* 28, 174-181.
- Zhang, B., Wang, K., Hasjim, J., Li, E., Flanagan, B. M., Gidley, M. J. y Dhital, S. (2014). Freeze-drying changes the structure and digestibility of  $\alpha$ -Polymorphic starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62, 1482-1491.
- Zhang, L., Hu, X., Xu, X., Jin, Z. y Tian, Y. (2011). Slowly digestible starch prepared from rice starches by temperature-cycled retrogradation. *Carbohydrate Polymers* 84, 970-974.
- Zhou, M. X., Robards, K., Glennie-Holmes, M. y Helliwell, S. (1998). Structure and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry* 75, 273-281.