

NIXTAMALIZACIÓN DE CINCO VARIEDADES DE MAÍZ CON DIFERENTE DUREZA DE GRANO: IMPACTO EN CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CAMBIOS FISICOQUÍMICOS

NIXTAMALIZATION OF FIVE CORN VARIETIES WITH DIFFERENT KERNEL HARDNESS: IMPACT IN FUEL CONSUMPTION AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

Laura Roque-Maciel¹, Gerónimo Arámbula-Villa², Mirna López-Espíndola¹, Hipólito Ortiz-Laurel¹, Aquiles Carballo-Carballo³, J. Andrés Herrera-Corredor^{1*}

¹Programa de Innovación Agroalimentaria Sustentable. Campus Córdoba. Colegio de Postgraduados. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, 94946. Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. (jandreshc@colpos.mx). ²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Querétaro. Libramiento Norponiente No. 2000. Fraccionamiento Real de Juriquilla. 76230. Querétaro, Querétaro, México. ³Genética. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México, México.

RESUMEN

La nixtamalización causa en el grano de maíz cambios físicos, químicos y reológicos que afectan la calidad de la masa y la tortilla. La nixtamalización tradicional de maíz, realizada principalmente en contenedores abiertos, presenta una muy baja utilización de la energía requerida para este proceso, porque puede usar hasta 70 % más del combustible necesario. La correcta selección de los maíces para nixtamalizar contribuye en la calidad de las tortillas y el ahorro de combustible. El objetivo de este estudio fue determinar las modificaciones físicas, químicas, y térmicas que ocurren durante la nixtamalización de granos de variedades de maíz con diferente grado de dureza y su relación con el consumo de combustible y demanda energética durante el proceso. El consumo de combustible y los cambios fisicoquímicos en el grano y en el agua de cocimiento o nejayote se monitorearon durante la cocción alcalina de cinco variedades de maíz. Los valores de pH en el nejayote se redujeron después de la cocción alcalina en un promedio de 0.2 unidades. El tiempo de cocimiento fue 26.6, 31.6, 36.6, 31.6, y 38.3 min, con un consumo de gas de 112.6, 119.2, 125.9, 119.2, y 128.1 g para las variedades Criollo, Mont265, Mont360, Mont363 y Mont41, respectivamente. Los granos de menor dureza, menor densidad absoluta y peso hectolítrico requirieron la menor cantidad de combustible para nixtamalización. Las propiedades reológicas de las harinas durante la nixtamalización tuvieron comportamientos similares excepto Mont265 cuyo grano es más pequeño. Las

ABSTRACT

“Nixtamalization” causes in corn grain physical, chemical and rheological changes that affect the quality of the dough and tortilla. The traditional corn nixtamalization, carried out mostly in open containers, presents a very poor utilization of the energy required for this process, as it can take up to 70 % more of the fuel required. The correct selection of corns for nixtamalization contributes to the quality of tortillas and fuel saving. The aim of this study was to determine the physical, chemical, and thermal changes that occur during nixtamalization of corn grain varieties with different degrees of hardness and its relation to fuel consumption and energy demand during the process. Fuel consumption and physical and chemical changes in the grain and the cooking water or “nejayote” were monitored during the alkaline cooking of five varieties of corn. In the nejayote, pH values decreased after alkaline cooking in an average of 0.2 units. Cooking time was 26.6, 31.6, 36.6, 31.6, and 38.3 min, with gas consumption of 112.6, 119.2, 125.9, 119.2, and 128.1 g for the varieties Criollo, Mont265, Mont360, Mont363 and Mont41 respectively. Grains of lower hardness, absolute density and test weight required the least amount of fuel for nixtamalization. The rheological properties of flour during nixtamalization had similar behavior except Mont265 variety whose grains are smaller. The thermal properties of flour were similar after an increase in the gelatinization temperature of the samples taken at the end of nixtamalization. It is concluded that besides determining the quality characteristics of the dough and tortillas produced, it is necessary to know the energy parameters required for the nixtamalization of the of the corn varieties.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2015. Aprobado: enero, 2016.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 727-745. 2016.

propiedades térmicas de las harinas fueron similares con un aumento en la temperatura de gelatinización en las muestras tomadas al final de la nixtamalización. En conclusión, además de determinar las características de calidad de la masa y tortillas producidas, es necesario conocer los parámetros energéticos requeridos para la nixtamalización de los granos de las variedades de maíz.

Palabras clave: Maíz, nixtamalización, cambios fisicoquímicos, tiempo de cocción, combustible.

INTRODUCCIÓN

La nixtamalización es una manera efectiva para mejorar el valor nutricional del maíz (Martínez-López *et al.*, 2011) para consumo humano (como tortilla, principalmente) que está muy relacionado con la seguridad alimentaria. Pero el consumo diario de tortilla en México disminuyó de 249 g por habitante en 2002 a 157 g en 2010. Esto obedece al cambio en los hábitos alimenticios de la población, y al aumento en el costo de los insumos para la producción de tortilla que afecta directamente al consumidor final (Secretaría de Economía, 2012). La nixtamalización es un proceso térmico que requiere de una combinación de temperatura y tiempo para lograr los cambios adecuados en los granos de maíz para su uso en la elaboración de alimentos (Méndez-Montalvo *et al.*, 2008). Ahora hay equipos más eficientes para optimizar el uso de la energía en la nixtamalización y obtener un producto aceptable con las características requeridas por el consumidor (Rodríguez *et al.*, 2008). Una manera adicional para reducir el uso de energía es la correcta selección del tipo de granos ya que en México y el mundo hay unas 600 variedades que se pueden usar para este fin.

El proceso de nixtamalización se ha estudiado por varios autores (Gómez *et al.*, 1989; González *et al.*, 2005; Fernández-Muñoz *et al.*, 2006; Gutiérrez *et al.*, 2007; Méndez-Montalvo *et al.*, 2008), quienes indican que la dureza del grano así como su composición son factores que influyen las variables del proceso de nixtamalización, en particular el tiempo de cocción (Sahai *et al.*, 2001). El tiempo de cocción es un factor crítico durante la nixtamalización y es variable porque este tiempo se determina con base en la experiencia (Milán-Carrillo *et al.*, 2004), y se determina de manera empírica mediante variables cualitativas como el desprendimiento del pericarpio con los dedos (Cornejo-Villegas *et al.*, 2008).

Keywords: Corn, nixtamalization, physicochemical changes, cooking time, fuel

INTRODUCTION

Nixtamalization is an effective way to improve the nutritional value of corn (Martínez-López *et al.*, 2011) for human consumption (mainly as tortilla) that is closely related to food security. But the daily tortilla consumption in Mexico fell from 249 g per capita in 2002 to 157 g in 2010. This is due to a change in the eating habits of the population, and the increase in the cost of inputs for tortilla production that directly affects the final consumer (Ministry of Economy, 2012). Nixtamalization is a thermal process that requires a combination of temperature and time to achieve adequate changes in grain corn for its use in food preparation (Méndez-Montalvo *et al.*, 2008). Nowadays there are more efficient equipment to optimize the use of energy in the nixtamalization process and obtain an acceptable product with the characteristics required by the consumer (Rodríguez *et al.*, 2008). An additional way to reduce energy use is the correct selection of the type of grain, as in Mexico and the world there are about 600 varieties that can be used for this purpose.

Nixtamalization has been studied by several authors (Gómez *et al.*, 1989; González *et al.*, 2005; Fernández-Muñoz *et al.*, 2006; Gutiérrez *et al.*, 2007; Méndez-Montalvo *et al.*, 2008) who indicate that grain hardness and its composition are factors that influence nixtamalization process variables, including cooking time (Sahai *et al.*, 2001). Cooking time is a critical factor during nixtamalization and is variable because is determined based on experience (Milán-Carrillo *et al.*, 2004), and empirically by qualitative variables, such as the removal of the pericarp by using the fingers (Cornejo-Villegas *et al.*, 2008).

An important variable of the nixtamalization industry is the grain hardness, as hard grain (Billeb de Sinibaldi and Bressani, 2001) varieties that meet the quality criteria for the preparation of tortilla are preferred (Rangel-Meza *et al.*, 2004). Grain hardness is directly related to the cooking time and this, in turn, with the fuel and energy used in nixtamalization. The use of energy from fossil fuels in all industries is a global concern because it is not renewable, so it is necessary to use it more efficiently. In the literature reviewed there are no studies about

Una variable importante para la industria de la nixtamalización es la dureza del grano ya que se prefieren los granos duros (Billeb de Sinibaldi y Bressani, 2001) de variedades que cumplan con los criterios de calidad para la preparación de tortilla (Rangel-Meza *et al.*, 2004). La dureza del grano tiene relación directa relacionada con el tiempo de cocción y este a su vez con el consumo de combustible y la energía usada en la nixtamalización. El uso de la energía de combustibles fósiles en todas las industrias es una preocupación mundial porque no son energías renovables, por lo cual se debe eficientar su uso. En la literatura revisada no hay estudios acerca del consumo de combustible en relación con la nixtamalización y la dureza del grano de maíz. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar las modificaciones físicas, químicas y térmicas en la nixtamalización de variedades maíz blanco con diferente dureza y su relación con el consumo de combustible y demanda energética.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se usó grano limpio de tres cruces simples de híbridos de maíz blanco de Valles Altos: Mont360, Mont41 y Mont363; además se usó una cruz simple tropical tipo Sinaloa identificada como Mont265. Todos estos materiales fueron proporcionados por el Área de Mejoramiento y Control de la Calidad Genética del Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. La siembra se realizó en Montecillo, Estado de México, durante el ciclo primavera-verano 2013, con riego según la demanda del cultivo y fertilización con la fórmula 160-60-60 (N-P-K). La cosecha se realizó en noviembre del 2013. Como referencia se incluyó una variedad Criollo Chalqueño que se obtuvo del municipio de Rafael Grajales, estado de Puebla, ubicado en 19° 13' 35.79" N y 97° 47' 56.12" O con una altitud de 2381 m y se codificó como Criollo.

Variables físicas de los granos

El índice de flotación se evaluó mediante la metodología de (Wichser, 1961) utilizando una solución de nitrato de sodio a temperatura ambiente con una gravedad específica de 1.275. El peso de mil granos se calculó pesando 100 granos de cada variedad en una balanza granataria digital Scout® Pro (Ohaus Corporation, 194 Chapin Road. NJ07058. EE.UU.) y el resultado se multiplicó por 10. La humedad en grano y nixtamal se evaluó con el método 934.01 de la AACC (2000), la densidad absoluta

fuel consumption in relation to the nixtamalization and hardness of corn grain. Therefore, the objective of this study was to determine the physical, chemical and thermal changes in the nixtamalization of white corn varieties of different hardness and their relation to fuel consumption and energy demand.

MATERIALS AND METHODS

In this study we used clean grain of three single crosses of white corn hybrids from Valles Altos: Mont360, Mont41 and Mont363; plus a simple tropical Sinaloa type cross known as Mont265. All these materials were provided by the Department of Breeding and Genetic Quality Control of the Postgraduate Degree in Genetic Resources and Seed Productivity-Production, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Corn grain sowing was carried out in Montecillo, Estado de Mexico, during the spring-summer 2013, under irrigation according to the crop demand and fertilization with the formula 160-60-60 (N-P-K). Corn harvesting took place in November 2013. As a reference we included the variety Criollo Chalqueño obtained from the municipality Rafael Grajales, State of Puebla, located at 19° 13' 35.79" N and 97° 47' 56.12" W, at an altitude of 2 381 m, and was coded as Criollo.

Physical variables of grains

The flotation index was evaluated with the methodology by Wichser, (1961) using a sodium nitrate solution at room temperature with a specific gravity of 1.275. The thousand grain weight was calculated by weighing 100 grains of each variety with a digital Scout® Pro scale (Ohaus Corporation, 194 Chapin Road. NJ07058. USA) and multiplying the result by 10. Grain and nixtamal moisture was evaluated using the 934.01 AACC method (2000), absolute density with the Kniep and Mason method (1989), and test weight with the AACC 55-10 (2000) technique. Grain size was determined by measuring its length, width and thickness with a digital gauge of 152.4 mm (6") (Truper®, Mexico, with approximation to 0.01 mm) taking a random sample of 10 grains of each variety.

Pericarp area

This variable was determined by soaking 10 grains of corn in a glass of water at room temperature for 3 min, then they were removed and excess water was dried with a cloth. Several vertical cuts were made in the grain to separate the pericarp with tweezers without breaking it. The extended pericarp was dried during one day at room temperature and then we scanned it (Epson Perfection

con el método de Kniep y Mason (1989), y el peso hectolítrico con la técnica 55-10 AACC (2000). El tamaño del grano se determinó midiendo su largo, ancho y grosor con un calibrador digital de 152.4 mm (6") (Truper®, México, con aproximación a 0.01 mm) tomando una muestra aleatoria de 10 granos de cada variedad.

Área de pericarpio

Esta variable se determinó remojando 10 granos de maíz en un vaso con agua a temperatura ambiente por 3 min, se sacó y se eliminó el exceso de agua con un paño seco. Varios cortes verticales se hicieron en el grano para separar el pericarpio con unas pinzas sin romperlo. El pericarpio extendido se secó por un día al ambiente, y luego se escaneó (Epson Perfection V200 Photo, EE.UU.) para generar una imagen digital en formato TIFF a una resolución de 300 ppp. La imagen se convirtió a blanco y negro para resaltar el pericarpio y el área ocupada por el pericarpio de cada grano se coloreó con la función de selección por color con el programa GIMP ver. 2.8. La cantidad de píxeles correspondiente al pericarpio de cada grano se contó con la función Histograma. El valor en píxeles se convirtió a cm^2 usando la resolución de la imagen: $300 \text{ ppp} / 2.54 = 118 \text{ ppcm}$ (ppp: píxeles por pulgada; y ppcm: píxeles por centímetro); así, $118.11^2 = 13\,950.02$ píxeles representan 1 cm^2 . Por lo tanto, el valor determinado en píxeles por el software para cada pericarpio, dividido entre $13\,950.02$, se reportó como área de pericarpio por grano de maíz. Los valores promedio de cada variedad se usaron con los valores promedio del peso de mil granos para calcular el área de pericarpio por unidad de peso con la fórmula: Área por unidad de peso = $(1000 / \text{peso de } 1000 \text{ granos}) \times (\text{área por grano})$ y el valor se reportó en $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Estos valores permitieron visualizar el área de pericarpio total que existe en una misma cantidad de peso y para comparar el área disponible para la absorción de agua e iones de calcio, tanto en el perfil de absorción de agua a temperatura ambiente, como durante el proceso de nixtamalización.

Perfil de absorción de agua

El perfil de absorción de agua se determinó a 10, 20, 30 y 40 min, para lo cual se pesaron $20 \pm 1 \text{ g}$ de maíz y se colocaron en 50 mL de agua a temperatura ambiente usando vasos de precipitado PYREX® de 150 mL. Los granos se extrajeron y se eliminó el exceso de agua con una centrifuga plástica manual para vegetales. Luego los granos se pesaron y se calculó el agua absorbida por gramo de maíz realizando dos repeticiones por cada tiempo y por cada variedad, utilizando la fórmula: Agua absorbida = $\text{Pagua} / \text{Pmaíz}$; donde Agua absorbida = cantidad de agua absorbida por gramo de maíz; Pagua = peso del grano después de ser sumergido

V200 Photo, USA) to generate a digital image in TIFF format at a 300 dpi resolution. The image was changed to black and white to highlight the pericarp, and colored the area occupied by the pericarp of each grain area with the color selection function of program GIMP version 2.8. The amount of pixels corresponding to each grain pericarp was counted with the Histogram function. The value in pixels was converted to cm^2 using the image resolution, ie $300 \text{ dpi} / 2.54 = 118 \text{ ppcm}$ (ppi: pixels per inch, and ppcm: pixels per centimeter); thus, $118.11^2 = 13,950.02$ pixels represent 1 cm^2 . Therefore, the value determined in pixels by the software for each pericarp divided between $13,950.02$ was reported as pericarp area per corn grain. The average values of each variety were used with average values of the weight of one thousand grains to calculate the area of pericarp per weight unit using the formula: Area per weight unit = $(1000 / \text{weight of } 1000 \text{ grains}) \times (\text{area per grain})$. The value was reported in $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$. These values allowed to display the full pericarp area existing in a same amount of weight and compare the area available for water and calcium ions absorption, both in the profile of water absorption at room temperature and during nixtamalization.

Water absorption profile

The profile of water absorption was determined at 10, 20, 30 and 40 min, for which $20 \pm 1 \text{ g}$ corn were weighed and placed in 50 mL of water at room temperature using Pyrex® 150 mL beakers. Grains were removed and excess water was eliminated with a manual plastic centrifuge for vegetables. Then we weighed grains and calculated the water absorbed per gram of corn performing two replicates each time and for each variety using the formula: Water absorbed = $\text{Pwater} / \text{Pcorn}$; where Water absorbed = amount of water absorbed per gram of corn; Pwater = weight of grain after being submerged in water and left there for (g) time minus the dry weight of corn ($20 \pm 1 \text{ g}$) and Pcorn = $20 \pm 1 \text{ g}$.

Corn nixtamalization

The traditional method similar to that described by Fernández-Muñoz *et al.* (2004) was used for nixtamalization. Treatments were performed at Colegio de Postgraduados, Córdoba Campus, state of Veracruz, located at 645 masl, $18^{\circ}51'32.65'' \text{ N}$ and $96^{\circ}51'36.96'' \text{ W}$. For this purpose, 5 L drinking water and 20 g calcium hydroxide food grade (Oxical®, Mexico) were poured in a stainless steel bowl without lid (to simulate conditions of commercial tortilla stores) and placed it in a stove made of stainless steel, equipped with an iron burner Mod. QH-128 of 12.8 cm in diameter (Industrias Magaña L, Santa Ana, El Salvador) at a minimum flame.

en agua y transcurrido el tiempo (g) menos el peso seco del maíz (20 ± 1 g) y $P_{\text{maíz}} = 20 \pm 1$ g.

Nixtamalización del maíz

El método tradicional similar al descrito por Fernández-Muñoz *et al.* (2004) se usó para la nixtamalización. Los tratamientos se realizaron en el Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba, Córdoba, estado de Veracruz, ubicado a 645 msnm, $18^{\circ} 51' 32.65''$ N y $96^{\circ} 51' 36.96''$ O. Para ello se vertieron 5 L de agua potable y 20 g de hidróxido de calcio de grado alimenticio (Oxical®, México) en un recipiente de acero inoxidable sin tapa (para simular las condiciones de las tortillerías comerciales) colocada en una estufa fabricada en acero inoxidable, equipada con un quemador de hierro Mod. QH-128 de 12.8 cm de diámetro (Industrias Magaña L, Santa Ana, El Salvador) y con una flama ajustada al mínimo.

La temperatura del agua precalentada se midió con un termómetro digital (Taylor® Precision Products, EE.UU.) hasta alcanzar 80°C . Después se agregaron 2 kg de maíz y se tomaron muestras de maíz y agua de cocción por 45 min en los tiempos t_0 , t_5 , t_{10} , t_{15} , t_{20} , t_{25} , t_{30} , t_{35} , t_{40} y T_{45} . Para cada variedad se realizaron tres repeticiones de la nixtamalización.

El tiempo de cocimiento se basó en el tiempo total en que se desprendió el pericarpio del grano. El desprendimiento del pericarpio se determinó de forma subjetiva seleccionando tres granos de manera aleatoria de cada muestra tomada cada 5 min durante los 45 min. Los granos se frotaron entre los dedos intentando remover el pericarpio del grano y el resultado se registró usando una escala binomial utilizando Si (1) para desprendimiento del pericarpio y No (0) cuando no hubo remoción de pericarpio.

Determinación del pH del agua de cocimiento

De las muestras tomadas del agua de cocimiento en periodos de 5 min, se colocaron 50 mL en vasos de precipitado PYREX® de 100 mL y se midió el pH con un potenciómetro Orion 3-Star (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts, EE.UU.). Tres repeticiones por variedad se realizaron para cada tiempo (t_0 - t_{45}).

Fuerza de corte del grano y nixtamal

La fuerza de corte del grano seco y nixtamalizado se determinó mediante un texturómetro Shimadzu® modelo Ez-5 (Kyoto, Japón), el software Trapezium2® para Windows® y equipado con una navaja Warner-Bratzler diseñada para la evaluación de carne, pero se ha utilizado para evaluar productos como pastas y vegetales (Bibat *et al.*, 2014). El grano se colocó de manera transversal a 1.5 cm de distancia de la navaja para determinar la

Preheated water temperature was measured with a digital thermometer (Taylor® Precision Products, USA) up to 80°C . Then we added 2 kg of corn, and corn samples and cooking water were taken for 45 min at t_0 , t_5 , t_{10} , t_{15} , t_{20} , t_{25} , t_{30} , t_{35} , t_{40} and T_{45} times. Three repetitions of nixtamalization were carried out for each variety.

Cooking time was based on the total time requires for pericarp removal. The detachment of the pericarp was determined subjectively by selecting three grains at random from each sample taken every 5 min for 45 min. The grains were rubbed with the fingers trying to remove the pericarp from the grain and the result was recorded using a binomial scale of Yes (1) when the pericarp was detached, and No (0) when there was no removal of the pericarp.

Cooking water pH determination

Of the samples taken from the cooking water in periods of 5 min, we placed 50 mL in beakers PYREX® 100 mL and measured the pH with an Orion 3-Star potentiometer (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts, USA). Three replicates per variety were carried out for each time range (t_0 - t_{45}).

Grain cutting force and nixtamal

The cutting force of dry and nixtamalized grain was determined by a texture analyzer Shimadzu® model Ez-5 (Kyoto, Japan), the Trapezium2® software for Windows® and equipped with a Warner-Bratzler knife designed to evaluate meat, but it is also used to evaluate products such as pasta and vegetables (Bibat *et al.*, 2014). The grain was placed transversely at a distance of 1.5 cm from the knife to determine the force required to cut the grain. The determination was performed at room temperature in compression mode, at a speed of 1 mm s^{-1} in three grains at t_0 and three grains at each sampling time during nixtamalization (t_5 - t_{45}).

Nixtamal drying process and flour production

The nixtamal samples were placed in tubes for an Evergreen® centrifuge and sealed with self-adhesive film with small holes. Then we put them in a Savant Model SC210A Thermo Scientific Model 81 concentrator (Wyman Street Waltham, MA, USA) and dehydrated them at 45°C for 24 h. The grain was ground with a Krups Mod GX410011 mill (Col. Polanco 11560, Mexico, DF) and passed through a 60 mesh sieve to obtain flour.

fuerza requerida para cortar el grano. La determinación se realizó a temperatura ambiente en modo de compresión, una velocidad de 1 mm s^{-1} en tres granos al t_0 y tres granos en cada tiempo de muestreo durante la nixtamalización (t_5 - t_{45}).

Secado de nixtamal y obtención de harinas

Las muestras de nixtamal se colocaron en tubos para centrifugadora Evergreen® sellados con película autoadherente con pequeños orificios. Luego se colocaron en un concentrador Thermo Scientific Modelo Savant SC210A 81 (Wyman Street Waltham, MA, EE.UU.) y se deshidrataron a 45 °C por 24 h. El grano se molió con un molino Krups Mod GX410011 (Col. Polanco 11560, México D.F.) y tamizó con un tamiz de malla 60 para obtener la harina.

Propiedades de la pasta (análisis de viscosidad)

Las propiedades de la pasta se determinaron con un Rapid Visco Analyser (RVA series S4A Newport® Sci. Unit, Australia). La muestra se preparó pesando 4 g de harina de grano ($t=0$) y nixtamalizada ajustada a 14 % de humedad en una balanza (Dever® Instrument, EE.UU.), se agregó agua destilada suficiente hasta completar 28 g y se introdujo la muestra en el equipo. El perfil de temperatura fue: temperatura inicial 50 °C ; permaneció 1 min a 50 °C ; se elevó la temperatura de 50 a 92 °C con una velocidad de 7.5 °C/min ; permaneció 5 min a 92 °C ; se bajó la temperatura de 92 a 50 °C a 7.5 °C/min (misma velocidad de calentamiento); permaneció 1 min a 50 °C , y terminó la prueba con un tiempo de 22 min. Con el software del equipo se generó una curva de viscosidad respecto al tiempo y perfil de temperatura empleado. De este perfil de viscosidades se obtuvo el pico máximo de viscosidad y la viscosidad de retrogradación en centipoises (cP) de la muestra. Para esta prueba se utilizaron harinas de los tiempos t_0 , t_{10} , t_{20} , t_{35} , y t_{45} , de cada variedad por duplicado.

Propiedades térmicas de la harina de maíz nixtamalizado

Para determinar las temperaturas (inicial, máxima y final) y entalpía de gelatinización de la harina de maíz nixtamalizado se utilizó un Calorímetro Diferencial de Barrido (Mettler- México D.F.). La muestra se preparó pesando 3 mg de harina, se colocó en un crisol de aluminio de baja presión y se agregó $7 \mu\text{L}$ de agua destilada. El crisol se selló herméticamente y se colocó junto con una muestra de referencia sin material en el platillo transmisor de calor. La tasa de calentamiento fue de 10 °C min^{-1} desde 30 °C hasta 100 °C . Para esta prueba se usó harina cruda (t_0) y harinas nixtamalizadas para t_{20} y t_{45} . La prueba se realizó por duplicado para cada variedad.

Dough properties (viscosity analysis)

The dough properties were determined with a Rapid Visco Analyser (RVA series S4A Newport® Sci. Unit, Australia). The sample was prepared by weighing 4 g of grain flour ($t=0$), and nixtamalized and adjusted to 14 % moisture on a scale (Dever® Instrument, USA); sufficient distilled water was added, up to 28 g and the sample was placed in the equipment. The temperature profile was: initial temperature 50 °C ; it remained 1 min at 50 °C ; temperature rose from 50 to 92 °C at a rate of 7.5 °C/min ; it remained 5 min at 92 °C ; it fell from 92 to 50 °C at a rate of 7.5 °C/min (same heating rate); it remained 1 min at 50 °C , and the test ended at 22 min. With the computer software a viscosity curve over time and the temperature profile was generated. From this profile of viscosities, the peak viscosity and viscosity in centipoise retrogradation (cP) of the sample were obtained. For this test we used flours of times t_0 , t_{10} , t_{20} , t_{35} , and t_{45} , of each variety in duplicate.

Thermal properties of nixtamalized corn flour

To determine the initial, maximum and final temperatures, and enthalpy of gelatinization of nixtamalized corn flour we used a differential scanning calorimeter (Mettler brand Mexico DF). The sample was prepared with 3 mg flour, then we placed it in a low pressure aluminum crucible and added $7 \mu\text{L}$ distilled water. The crucible was sealed and placed together with a reference sample without material in the plate heat transmitter. The heating rate was 10 °C min^{-1} from 30 °C to 100 °C . For this test we used raw flour (t_0) and nixtamalized flours for t_{20} and t_{45} . The test was performed in duplicate for each variety.

Determination of cooking heat

Heat required for nixtamalization

The required heat was calculated for each variety during nixtamalization. Nixtamalization was considered from the time the grain was poured into the alkaline solution heated until the grain pericarp detached (Figure 1). During this period and in periods of 5 min we calculated the heat levels required by corn and water, integrating all sections to obtain the heat required by grain and water during cooking. To the latter heat value the necessary heat was added during the water preheating stage to have the heat needed throughout the process. This was performed in triplicate for each variety. Temperature was held below 100 °C throughout the cooking time to prevent boiling, and only an average temperature of 90.1 °C was reached at the end of nixtamalization. For the energy calculation we discarded the heat required to warm up calcium hydroxide because the amount used

Determinación del calor de cocción

Calor requerido para la nixtamalización

El calor requerido se calculó por cada variedad durante la nixtamalización. La nixtamalización se consideró desde que el grano se vertió a la solución alcalina calentada hasta que se desprendió el pericarpio del grano (Figura 1). Durante este periodo y en lapsos de 5 min se estimó el calor que requirió el maíz y el agua, sumando todas las secciones para obtener el calor requerido por el grano y el agua durante la cocción. Al último valor de calor se sumó el calor necesario durante la etapa de precalentamiento del agua para tener el calor necesitado durante todo el proceso. Esto se realizó para cada variedad por triplicado. La temperatura se mantuvo abajo de 100 °C durante todo el tiempo de cocimiento para evitar la ebullición, y solo se alcanzó una temperatura promedio de 90.1 °C al final de la nixtamalización. Para el cálculo energético se despreció el calor requerido para calentar el hidróxido de calcio porque la cantidad usada fue mínima (1 % del peso del grano). Para la estimación del calor se usó un C_p del maíz = 2.27 kJ mol kg⁻¹ °K⁻¹ el cual se obtuvo como promedio de los valores de C_p reportados para maíz de la ASAE/ASABE (1999). Para el agua se usó un C_p = 4.18 kJ mol kg⁻¹ °K⁻¹. El cálculo del calor sensible usado en el sistema se realizó con la ecuación: $Q = mC_p\Delta T$, donde m = masa del material (kg); C_p = calor específico del material (kJ mol kg⁻¹ °K⁻¹); ΔT = diferencia de la temperatura final menos la inicial (°K).

Calor aportado por el combustible

Para estimar la cantidad de calor aportado por el combustible se determinó el flujo másico del gas (kg min⁻¹) mediante una

was low (1 % of grain weight). To estimate heat we used a corn $C_p = 2.27$ kJ mol kg⁻¹ K⁻¹ which we obtained as average of the C_p values reported for corn of ASAE/ASABE (1999). For water we used $C_p = 4.18$ kJ mol kg⁻¹ K⁻¹. Calculation of the sensible heat used in the system was performed using the equation: $Q = mC_p\Delta T$, where m = mass of the material (kg); C_p = specific heat of the material (kJ mol kg⁻¹ °K⁻¹); ΔT = difference of the final temperature minus the initial temperature (°K).

Heat provided by the fuel

To estimate the amount of heat supplied by fuel we determined the gas mass flow (kg min⁻¹) by linear regression using the readings of time and weight of the gas cylinder during nixtamalizations. The calculated flow was 0.0013 kg min⁻¹. The calorific value of LP gas was set at 46 300 kJ kg⁻¹, according to Bishop and Maunder (1980). Gas consumption was calculated in two stages: 1) consumption to raise water temperature from room temperature to 80 °C, that is, preheating; 2) nixtamalization where gas consumption was considered until the time when the pericarp of the grain came off in each variety. For both stages the heat supplied by the gas was calculated with the formula: $Q = (m) (\text{cooking time} / t_{\text{cooking}}) (\text{P.C.})$ where Q = heat supplied by gas (kJ); m = mass flow of gas (kg min⁻¹); cooking time/ t_{cooking} = time of gas supply (min); P.C. = calorific value of gas (kJ kg⁻¹). The total amount of heat supplied by fuel for the nixtamalization of each variety was calculated by adding the amount of heat provided for preheating and that provided for cooking the corn. The differences between the heat required and the supplied were reported as heat losses in the system. For every variety three replicates were carried out.

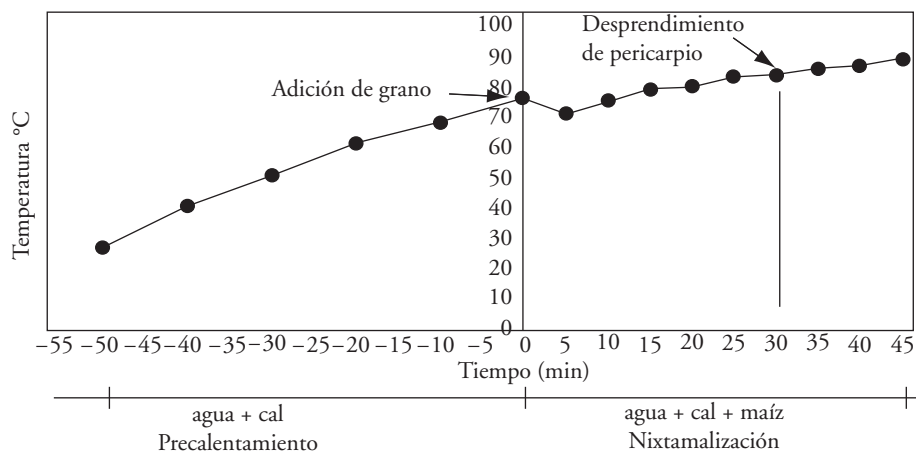


Figura 1. Diagrama del perfil de temperatura y tiempos utilizados para el cálculo del calor durante el proceso de cocimiento.
Figure 1. Diagram of the temperature and time profile used for calculating heat during the cooking process.

regresión lineal utilizando las lecturas del tiempo y el peso del tanque de gas durante las nixtamalizaciones. El flujo calculado fue $0.0013 \text{ kg min}^{-1}$. El poder calorífico del gas LP se fijó en $46\,300 \text{ kJ kg}^{-1}$, de acuerdo con Bishop y Maunder (1980). El cálculo del consumo de gas se realizó en dos etapas: 1) consumo para elevar la temperatura del agua de temperatura ambiente a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, esto es el precalentamiento; 2) nixtamalización donde se consideró el consumo de gas hasta el tiempo en que se desprendió el pericarpio del grano en cada variedad. Para ambas etapas el calor aportado por el gas se calculó con la fórmula: $Q=(m)(t_{\text{cocción}})(P.C.)$ donde Q =calor aportado por el gas (kJ); m =flujo másico del gas (kg min^{-1}); $t_{\text{cocción}}$ = tiempo en que se mantuvo el suministro de gas (min); P.C.= poder calorífico del gas (kJ kg^{-1}). La cantidad total de calor aportado por el combustible para la nixtamalización de cada variedad se calculó sumando la cantidad calor aportada para el precalentamiento y la aportada para la cocción del maíz. Las diferencias entre el calor requerido y el aportado se reportaron como pérdidas de calor en el sistema. Para cada variedad se realizaron tres repeticiones.

Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar para la caracterización de las variedades de maíz. Para el monitoreo del proceso de nixtamalización el diseño experimental fue completamente al azar en un arreglo factorial con dos factores: Variedad con cinco niveles, y Tiempo que dependió de los tiempos establecidos en cada prueba. Las comparaciones múltiples entre medias se realizaron con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Estos análisis estadísticos se realizaron con SAS ver 9.2 (SAS Institute, Inc. 2002). Además se usó el paquete R ver. 3.1.0 Spring Dance y el ambiente RStudio ver 0.98.932 para la regresión lineal en el cálculo de la velocidad de absorción del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas del grano

El índice de flotación mostró que la variedad con el valor más bajo fue Mont41 (19 %), y en las demás variedades los valores fueron cercanos o iguales a 100 % (Cuadro 1). Mont41 tuvo el peso hectolítrico más alto (79.74 kg hL^{-1}) y el Criollo el valor más bajo. De acuerdo con Salinas Moreno *et al.* (2010), un índice de flotación bajo y un peso hectolítrico alto es una característica de maíces de grano duro.

La variedad de maíz Criollo tuvo mayor peso de mil granos y Mont265 el peso menor. Esta variable es buen indicador indirecto para predecir el tamaño de

Statistical analysis

The experimental design was completely randomized for the characterization of corn varieties. For monitoring nixtamalization the experimental design was completely randomized in a factorial arrangement with two factors: Variety with five levels, and Time which depended on the times set in each test. Multiple comparisons between means were carried out with the Tukey test ($p \leq 0.05$). These statistical analyses were performed with SAS version 9.2 (SAS Institute, Inc. 2002). In addition, the R package version 3.1.0 Spring Dance with the integrated development environment RStudio version 0.98.932 were used for linear regression to calculate the water absorption rate.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical characteristics of grain

The flotation index showed that the variety with the lowest value was Mont41 (19 %), and in other varieties values were close or equal to 100 % (Table 1). Mont41 had the highest test weight (79.74 kg hL^{-1}) and the Criollo had the lowest value. According to Salinas Moreno *et al.* (2010), a low flotation index and high test weight are typical features of hard grain corn.

The Criollo corn variety had the highest 1000 grain weight and Mont265 had the lowest. This variable is a good indirect indicator to predict the size of grains (Lee *et al.*, 2012). Thus Criollo corn grains were larger and grains of Mont265 were smaller.

Grain moisture (Table 1) showed a range from 10.75 % to 11.48 %. Moisture differences between the varieties studied were not significant, indicating that the grains were homogeneous in this variable at the beginning of the study. Absolute density values (Table 1) showed an inverse relationship with the flotation index, thus confirming that a denser grain will have a lower flotation index ($r = -0.908$). The relationship between the test weight and the flotation index was inverse. In contrast, the density of corn and grain test weight indicated a direct relationship ($r = 0.969$).

Dimensions of grain and pericarp area size

Table 2 shows the data of actual dimensions of grain for each variety. The Criollo corn had the highest values in grain size and Mont265 the lowest.

Cuadro 1. Características físicas del grano de cinco variedades de maíz.
Table 1. Physical characteristics of grain from five varieties of corn.

Variedades	Índice de flotación (IF) (%)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Peso de mil granos (g)	Humedad (%)	Densidad absoluta (g mL ⁻¹)
Mont41	19±2.60 b	79.7±0.67a	346.0±10.5b	11.35±0.36a	1.29±0.02a
Mont265	100±0.00 a	73.3±0.89cd	255.5± 7.5d	10.89±0.99a	1.20±0.01c
Mont360	98±2.00 a	75.6±0.21b	290.0± 5.0c	11.48±0.84a	1.24±0.01b
Mont363	100±0.00 a	74.4±0.78bc	307.4± 8.8c	11.41±0.30a	1.23±0.01b
Criollo	99±1.10 a	72.4±0.22d	477.3±22.2a	10.75±0.47a	1.20±0.01c

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

los granos (Lee *et al.*, 2012). Así, los granos del maíz Criollo fueron más grandes y los de Mont265 fueron más pequeños.

La humedad del grano (Cuadro 1) tuvo un intervalo de 10.75 a 11.48 %. Las diferencias de humedad entre las variedades estudiadas no fueron significativas, indicando que los granos usados fueron homogéneos en esta variable al inicio del estudio. Los valores de densidad absoluta (Cuadro 1) mostraron una relación inversa con el índice de flotación, lo que confirma que un grano más denso tendrá un menor índice de flotación ($r = -0.908$). La relación entre el peso hectolítrico y el índice de flotación fue inversa; en contraste, la densidad de maíz y el peso hectolítrico del grano tuvieron una relación directa ($r = 0.969$).

Dimensiones del grano y área del pericarpio

El Cuadro 2 muestra los datos de dimensiones reales de grano para cada variedad. El maíz Criollo tuvo los valores más altos en las dimensiones del grano y Mont265 los más bajos. Estos resultados concuerdan con los de peso de mil granos y a su vez con el área de pericarpio de nuestro experimento. El área de pericarpio más pequeña se encontró en Mont360 y se puede explicar por el ancho de grano de esta variedad (7.58 mm). Sin embargo, en el área de pericarpio por unidad de peso ocurrió lo contrario ya que el grano con el tamaño más pequeño (Mont265) tuvo mayor área por unidad de peso. Esto se relaciona con la variable de peso de 1000 granos, donde para un mismo peso, el número de granos es mayor se tienen granos más pequeños.

These results agree with those obtained in thousand kernel weight and also with the pericarp area of our experiment. The smaller pericarp area was found in Mont360 and is due to the width of this grain variety (7.58 mm). However, in the pericarp area per weight unit the opposite occurred since the grain of the smallest size (Mont265) showed a larger area per weight unit. This is related to the variable weight of 1000 grains, where for the same weight the number of grains is greater when these are smaller.

Water absorption profile by grain at room temperature

The variety that absorbed more water was the Criollo, contrasting with Mont41 and Mont360 that absorbed less (Table 3). However, the variety that absorbed more water at the beginning was Mont265 (Figure 2) which had a larger pericarp area per weight unit (Table 2). Despite this, the grain tended to stop absorbing water after 20 min, which can be due to its small size that led to its rapid saturation with water. The Criollo variety absorbed water for a longer time because, according to the flotation index and thousand kernel weight, the Criollo is a soft grain with greater porosity which allowed absorbing water even up to 40 min. The Mont363 variety had a similar behavior. The varieties Mont41 and Mont360 absorbed less water although their rate of water absorption was intermediate in relation to other varieties. Bressani (2008) indicated that the grain hardness is a variable linked to water absorption, because in corn varieties with higher content of hard

Cuadro 2. Dimensiones del grano y área del pericarpio de variedades de maíz.**Table 2. Dimensions of grain and pericarp area of corn varieties.**

Variedad	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Largo (mm)	Área del pericarpio por grano (cm ²)	Área del pericarpio por peso (cm ² g ⁻¹)
Mont41	8.23±0.72ab	4.57±0.20ab	10.45±0.76b	2.87±0.35b	8.29
Mont265	8.51±0.65a	4.07±0.41b	9.36±0.98b	2.62±0.44b	10.29
Mont360	7.58±0.49b	4.39±0.48ab	10.00±1.16b	2.42±0.37b	8.37
Mont363	8.33±0.64ab	4.40±0.67ab	10.17±0.81b	2.83±0.32b	9.20
Criollo	8.63±0.85a	5.06±0.62a	13.22±0.81a	3.46±0.62a	7.24

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Perfil de absorción de agua a temperatura ambiente por el grano

La variedad que absorbió mayor cantidad de agua fue el Criollo, a diferencia de Mont41 y Mont360 que absorbieron menos agua (Cuadro 3). Pero la variedad que al inicio absorbió mayor cantidad de agua fue Mont265 (Figura 2) que tuvo un área mayor de pericarpio por unidad de peso (Cuadro 2). A pesar de esto, el grano tendió a dejar de absorber agua después de 20 min, lo cual se debería a que su tamaño pequeño puede causar una rápida saturación con agua. La variedad Criollo absorbió agua por más tiempo porque, de acuerdo con el índice de flotación y el peso de mil granos, el grano es suave con mayor porosidad lo que permitió absorber agua incluso hasta los 40 min. La variedad Mont363 tuvo un comportamiento similar. Las variedades Mont41 y Mont360 absorbieron menos agua aunque su velocidad de absorción de agua fue intermedia respecto a las demás variedades. Bressani (2008) indicó que la dureza del grano es una variable ligada a la absorción de agua porque en los maíces con mayor contenido de endospermo duro los gránulos de almidón están cubiertos en una matriz de proteína y el endospermo es más compacto, lo que dificulta la absorción de agua.

En resumen y considerando de manera conjunta las variables que presentaron la mejor correlación con la dureza del grano (índice de flotación, peso hectolítrico y densidad absoluta), las variedades se ordenaron en la siguiente secuencia de menor a mayor dureza: Criollo, Mont265, Mont360, Mont363, Mont41. Las variedades Mont360 y Mont363

endosperm starch granules are covered in a protein matrix, and the endosperm is more compact, which hinders water absorption.

In summary, taking into account the variables that showed the best correlation with grain hardness (flotation index, test weight and density), grain varieties were arranged in the following sequence from lower to higher hardness: Criollo, Mont265, Mont360, Mont363, Mont41. The Mont360 and Mont363 varieties were statistically not different in the flotation index.

Cuadro 3. Cantidad y velocidad de absorción de agua en el grano de cinco variedades de maíz.**Table 3. Number and rate of water absorption in the grain of five varieties of corn.**

Variedad	Agua absorbida (g _{agua} g _{maíz} ⁻¹)	Velocidad de absorción (g _{agua} min ⁻¹)
Mont41	0.06±0.02c	0.0012
Mont265	0.08±0.02abc	0.0004
Mont360	0.07±0.03bc	0.0013
Mont363	0.09±0.01ab	0.0013
Criollo	0.10±0.03a	0.0022

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$). Promedio de la absorción de agua por variedad. La velocidad de absorción se obtuvo calculando, por regresión lineal, el coeficiente de la variable independiente (Tiempo vs Agua absorbida) ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey; $p \leq 0.05$). Average water absorption per variety. The absorption rate was obtained calculating by linear regression the coefficient of the independent variable (Time vs. Water absorbed).

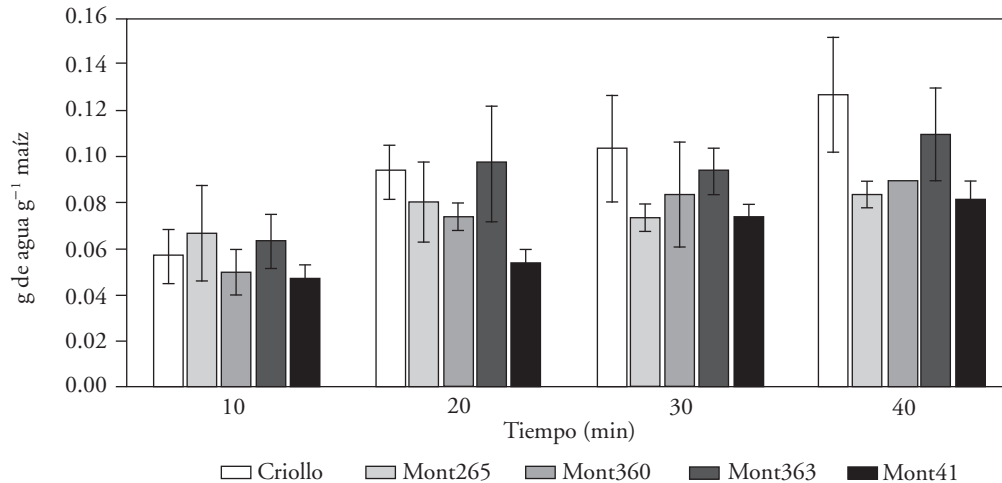


Figura 2. Efecto del tiempo de remojo en la absorción de agua por el grano de cinco variedades de maíz a temperatura ambiente.
Figure 2. Effect of soak time on the water absorption by the grain of five varieties of corn at room temperature.

fueron estadísticamente no diferentes en el índice de flotación.

Humedad del nixtamal

La humedad aumentó durante la nixtamalización ya que la acción de los radicales OH⁻ al reaccionar y deteriorar parte del pericarpio del grano facilitó la absorción de agua por el endospermo del grano (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004). Los valores de humedad promedio durante la nixtamalización tuvieron un intervalo de 29 % a 32 %; Mont360 y Mont41 presentaron los valores más bajos (28.68 % y 28.55 %, respectivamente) y el Criollo el valor más alto (31.37%).

La variable absorción de agua a temperatura ambiente (Cuadro 3) tuvo una relación positiva con la humedad promedio del grano desde t_0 hasta t_{45} (Cuadro 4) ($r=0.628$). Esto sugiere que la humedad del maíz nixtamalizado puede ser predicha antes de nixtamalizar el grano usando la prueba de absorción de agua a temperatura ambiente. En las variedades Criollo y Mont41 la humedad del nixtamal se estabilizó desde los 35 min, mientras que en Mont265, Mont360 y Mont 363, la humedad aumentó incluso hasta el minuto 45 (Figura 3).

En todos los casos, el nixtamal de las variedades tuvo una humedad baja (35 % promedio), comparado con lo reportado por Billeb y Bressani (2001) 40 %-43 %, Vázquez *et al.* (2012) 43.3 %- 51.3 % y Salinas *et al.* (2010) 45.8 %-49.7 %. Estas diferencias

Nixtamal moisture

Moisture increased during nixtamalization since the action of OH⁻ radicals when reacting and degrading part of the grain pericarp facilitated the absorption of water by grain endosperm (Sefa-Dedeh *et al.*, 2004). Average moisture values during nixtamalization had a range of 29 % to 32 %; Mont360 and Mont41 showed the lowest values (28.68 % and 28.55 % respectively) and the Criollo the highest value (31.37 %).

The variable water absorption at room temperature (Table 3) was directly related to the average grain moisture from t_0 to t_{45} (Table 4) ($r=0.628$). This suggests that nixtamalized corn moisture can be predicted before grain nixtamalization by using the water absorption test at room temperature. In the Criollo and Mont41 varieties the moisture of nixtamal stabilized after 35 min, whereas in the Mont265, Mont360 and Mont363, humidity increased even after 45 minutes (Figure 3).

In all cases, the nixtamal of the varieties had low moisture (35 % average), compared to those reported by Billeb and Bressani (2001) 40 %-43 %, Vázquez *et al.* (2012) 43.3 %- 51.3 % and Salinas *et al.* (2010) 45.8 %-49.7 %. These differences can be explained by the different times, temperatures and stages of nixtamalization used by these authors to report moisture: Billeb and Bressani (2001) used 50 min, 96 °C and reported about this variable during the

pueden explicarse por los diferentes tiempos, temperaturas y etapas de nixtamalización usados por dichos autores para reportar la humedad: Billeb y Bressani (2001) usaron 50 min, 96 °C y reportan esta variable durante el periodo de calentamiento; Salinas *et al.* (2010) y Vázquez *et al.* (2012) midieron la humedad de nixtamal después del reposo, cuando el grano continúa absorbiendo agua.

pH del nejayote

El pH del nejayote con respecto al tiempo (Figura 4) mostró la misma tendencia durante los primeros 5 min. Todas las muestras iniciaron con un pH alto, pero al transcurrir el tiempo ese valor disminuyó hasta el final del proceso en un promedio de 0.2 unidades. Las variedades Mont360 y Mont41 absorbieron menos agua durante la nixtamalización, lo cual sugiere una tendencia de estas variedades para absorber menor cantidad de iones tanto OH⁻¹ como Ca⁺² (Fernández-Muñoz *et al.*, 2004), lo cual pudo causar que el agua de cocimiento se mantuviera más alcalina. En contraste, el agua de cocimiento de la variedad Criollo tuvo un pH menor al resto, lo cual sugiere que absorbió más OH⁻ y Ca⁺² y dejando más iones H⁺ disponibles en la solución. De manera adicional a la absorción de agua por el grano, la disminución de la alcalinidad también se puede atribuir a la lixiviación (Ruiz-Gutiérrez *et al.*, 2010) de componentes

Cuadro 4. Valores medios del pH del agua de cocimiento (nejayote), la humedad y fuerza de corte del nixtamal en cinco variedades de maíz.

Table 4. Average values of cooking water pH (nejayote), moisture and cutting force of nixtamal in five varieties of corn.

Variedad	Potencial hidrógeno (pH)	Humedad (%)	Fuerza de corte (N)
Mont41	12.11±0.06b	28.55±7.26b	96.99±49.93a
Mont265	12.05±0.06c	30.45±8.91a	89.49±61.20b
Mont360	12.18±0.07a	28.68±7.26b	85.80±52.03b
Mont363	12.11±0.06b	29.17±7.66b	95.02±73.22a
Criollo	11.99±0.10d	31.37±8.93a	88.96±60.87b

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; p≤0.05) ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey; p≤0.05).

heating period; Salinas *et al.* (2010) and Vázquez *et al.* (2012) measured nixtamal moisture after soaking, when the grain continued to absorb water.

Nejayote pH

Nejayote pH (Figure 4) in relation to time showed the same trend during the first 5 min. All

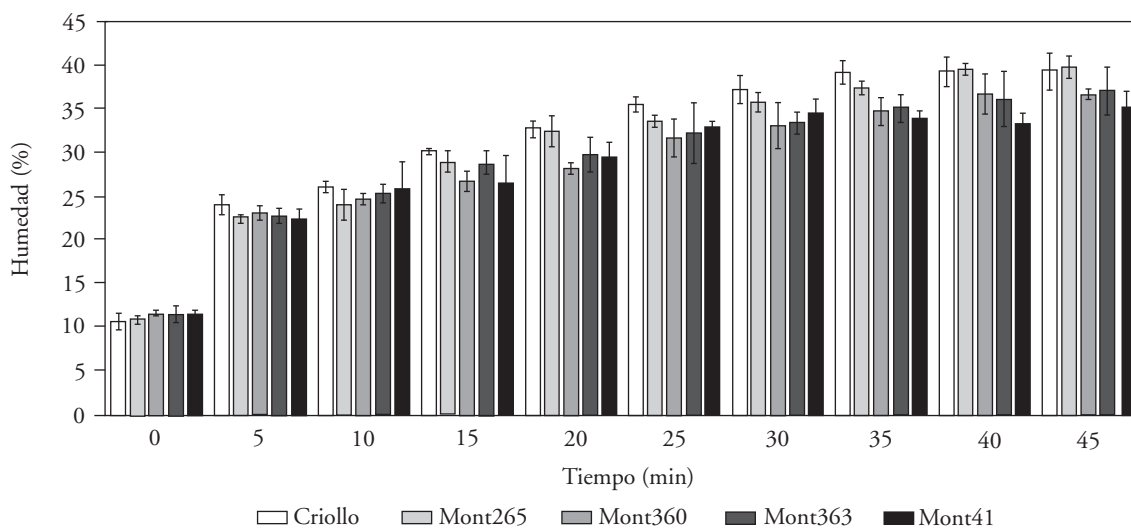


Figura 3. Humedad de grano de cinco variedades de maíz, a diferentes tiempos de nixtamalización.
Figure 3. Grain humidity of five varieties of corn at different times of nixtamalization.

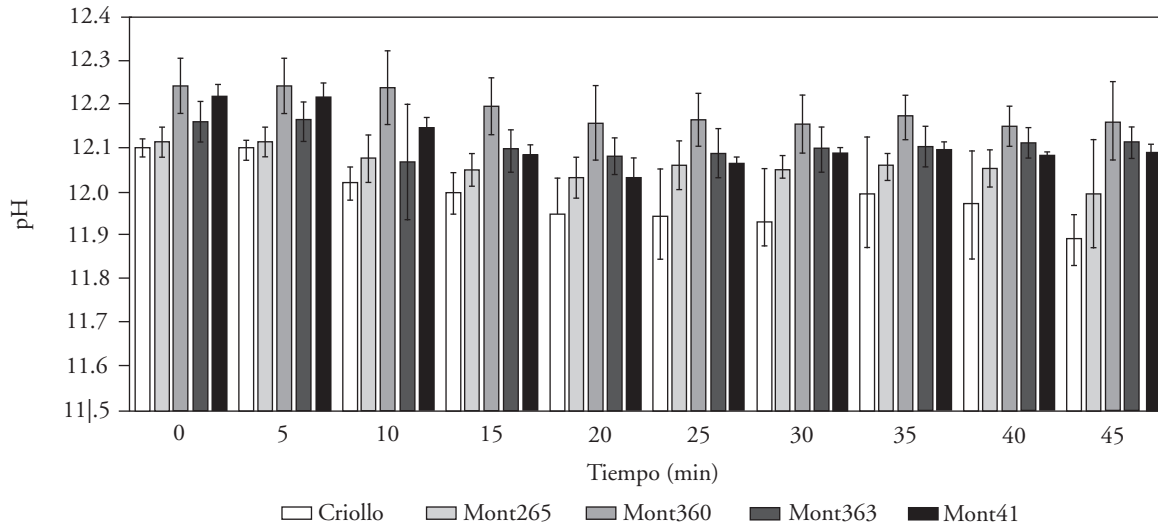


Figura 4. pH del agua de cocimiento (nejayote) de cinco variedades de maíz; cada variedad de maíz durante la nixtamalización.
Figure 4. Cooking water pH (nejayote) of five varieties of corn; each corn variety during nixtamalization.

de la hemicelulosa, como los ácidos urónicos y ácidos fenólicos (González *et al.*, 2005) que causan una reacción de neutralización del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Fuerza de corte del grano y nixtamal

En el tiempo (t_0), los granos de los maíces Criollo y Mont265 tuvieron la mayor fuerza de corte, pero Mont363 requirió menos fuerza de corte (Figura 5). Esta conducta inicial de la fuerza de corte del grano fue explicado por Shandera y Jackson (2002), quienes indicaron que la forma del grano, la superficie y el grosor tienen un efecto importante en las pruebas de textura de grano (Blandino *et al.*, 2010).

La fuerza de corte del nixtamal fue inversamente proporcional al tiempo ya que el grano fue más suave debido a la absorción de agua (Figura 5) y se redujo de 235 N a 95.3 N en promedio en los primeros minutos. Ibarra-Mendivil *et al.* (2008) reportan una tendencia similar en la fuerza para penetrar el grano con un punzón de 57.2 N (a 25 min) a 43.1 N (a 45 min), y después la reducción en la fuerza de corte fue más lenta. En el Cuadro 4 se presenta un resumen de los promedios del comportamiento de la humedad, pH y fuerza de corte en las cinco variedades.

samples started with a high pH, but as time passed, this value decreased until the end of the process in an average of 0.2 units. The Mont360 and Mont41 varieties absorbed less water during nixtamalization, suggesting the trend of these varieties of absorbing fewer ions both OH^- and Ca^{+2} (Fernández-Muñoz *et al.*, 2004), which could cause the cooking water to remain more alkaline. In contrast, the cooking water from the Criollo variety had a lower pH than the rest, suggesting it absorbed more OH^- and Ca^{+2} , leaving more H^+ ions available in the solution. Additionally to water absorption by the grain, the decrease of alkalinity may also be attributed to the lixiviation (Ruiz-Gutiérrez *et al.*, 2010) of components of hemicellulose such as uronic and phenolic acids (González *et al.*, 2005) which cause a neutralization reaction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Grain and nixtamal cutting force

In time (t_0), the Criollo and Mont265 corn grains had the highest cutting force, but Mont363 required less cutting force (Figure 5). This initial behavior of the grain cutting force was explained by Shandera and Jackson (2002), who indicated that grain shape,

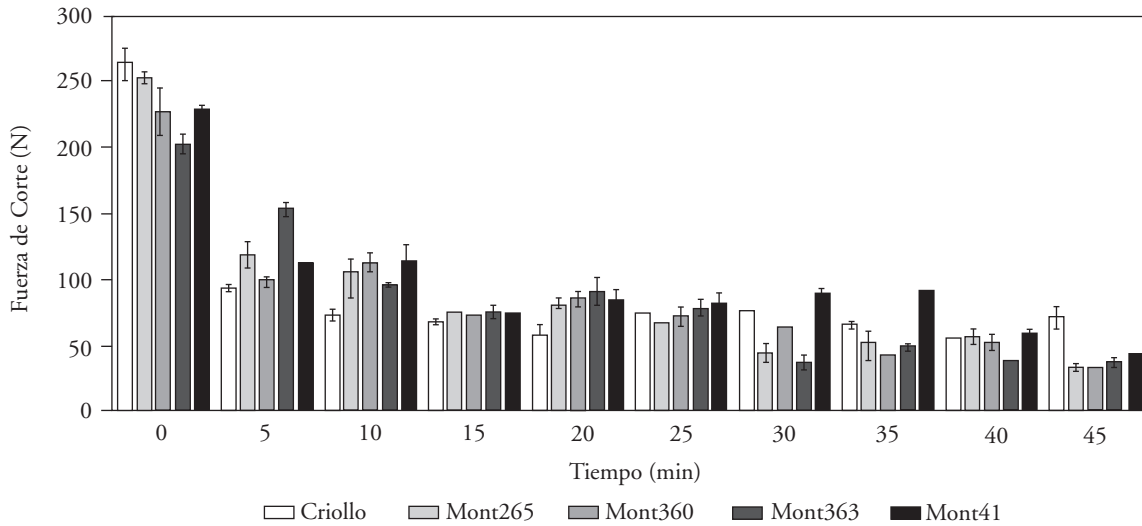


Figura 5. Fuerza de corte del grano de maíz (t=0) y el nixtamal a diferentes tiempos de cocción de cinco variedades de maíz.
Figure 5. Cutting force of corn grain (t=0) and nixtamal at different cooking times of five varieties of corn.

Propiedades reológicas de harina de maíz sin tritar (t₀) y harinas de nixtamal (t₁₀₋₄₅)

La viscosidad máxima promedio mostró diferencias significativas entre variedades (Cuadro 5). Mont265 mostró el valor más alto y la variedad Criollo el valor más bajo para todos los tiempos evaluados (t₀, t₁₀, t₂₀, t₃₅ y t₄₅). La viscosidad máxima disminuyó en el tiempo t₁₀ y mantuvo incrementando hasta el tiempo t₄₅. Este comportamiento fue similar para todas las variedades durante la nixtamalización, excepto para Mont265 donde el valor de esta variable

surface and thickness have an important effect on grain texture testing (Blandino *et al.*, 2010).

The cutting force of nixtamal was inversely proportional to the time since the grain was softer due to water absorption (Figure 5), reducing from 235 N to 95.3 N on average in the first minutes. Ibarra-Mendivil *et al.* (2008) reported a similar trend in the force to penetrate the grain with a punch from 57.2 N (25 min) to 43.1 N (45 min); then the reduction of cutting force was slower. Table 4 shows a summary of the average behavior of moisture, pH and cutting force in the five varieties.

Cuadro 5. Características reológicas y térmicas de las harinas de maíz nixtamalizado.
Table 5. Rheological and thermal characteristics of nixtamalized corn flours.

Variedad	Reológicas		Térmicas	
	Viscosidad máxima (cP)	Viscosidad de retrogradación (cP)	Temperatura de gelatinización (°C)	ΔH (J g ⁻¹)
Mont41	3369.33±525.54c	2261.92±937.53b	69.01±3.44ab	5.54±0.49c
Mont265	4737.92±958.11a	3015.33±1035.93a	68.62±3.26ab	6.34±0.41b
Mont360	3550.92±347.05b	2783.67±391.46a	69.39±1.03a	5.44±0.81c
Mont363	3256.00±548.24d	2629.75±465.15ab	68.00±2.32b	6.69±0.35a
Criollo	2976.08±751.54e	2246.17±464.62b	67.75±1.97b	6.35±0.49b

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; p≤0.05). ΔH = Entalpía ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey, p≤0.05). ΔH = Enthalpy.

aumentó en los tiempos t_{10} y t_{20} pero disminuyó en los tiempos t_{35} y t_{45} . Este comportamiento pudo estar relacionado con el tamaño de grano (pequeño).

La viscosidad de retrogradación presentó un comportamiento similar a la viscosidad máxima, esto es, un descenso al tiempo de nixtamalización t_{10} seguido por un incremento hasta el tiempo t_{45} . El descenso aparente entre el t_0 y el t_{10} pudieron ser causados por los cambios iniciales, como la absorción de calcio al tiempo t_{10} . El incremento fue más notorio en el maíz Criollo que coincidió con las características de un maíz suave. Las viscosidades de retrogradación promedio de las variedades Mont41 y Criollo fueron similares, al igual que las de Mont360 y Mont363. Después del cocimiento el almidón se recristaliza o reasocia para formar nuevas estructuras, lo que se conoce como retrogradación (Paredes López *et al.*, 2009). Al incrementar el tiempo, aumentó la viscosidad debido al efecto de la temperatura, porque al calentarse los gránulos de almidón captan más agua y se hinchan (Corn Refiners Association, 2006); Rodríguez *et al.*, 2008; Vaclavik y Christian, 2008).

Propiedades térmicas de harina de maíz sin tratar (t_0) y harinas de nixtamal (t_{10-45})

La temperatura de gelatinización promedio más alta se encontró en las variedades Mont41 y Mont360, mientras que la más baja fue en Criollo, y estos valores concuerdan con los reportados por Ruiz-Gutiérrez *et al.* (2010). La temperatura a la cual gelatiniza el almidón depende de la concentración del almidón, pH de la suspensión, velocidad de calentamiento y el procedimiento específico (Corn Refiners Association, 2006). Según Pineda-Gómez *et al.* (2011), la temperatura de gelatinización tiende a aumentar con el incremento en el tiempo de cocimiento por el aumento en el contenido de calcio durante la nixtamalización. Esto explica el aumento de la temperatura de gelatinización encontrada en el minuto 45 en todas las variedades. Además, estos valores coinciden con los reportados por Arámbula-Villa *et al.* (2001).

Con respecto a la entalpía de gelatinización (ΔH), que es la energía requerida por los granos de cada variedad para realizar el proceso de gelatinización (Pineda-Gómez *et al.*, 2010), la variedad que necesitó más energía fue Mont363, seguida por Criollo y Mont265; Mont41 y Mont360 tuvieron los valores más bajos (Cuadro 5).

Rheological properties of untreated corn flour (t_0) and nixtamal flours (t_{10-45})

The average maximum viscosity showed significant differences between varieties (Table 5). Mont265 variety showed the highest value and the Criollo variety the lowest value for all the times evaluated (t_0 , t_{10} , t_{20} , t_{35} and t_{45}). The maximum viscosity decreased at time t_{10} and kept increasing until time t_{45} . This behavior was similar for all varieties during the nixtamalization, except for Mont265 where the value of this variable increased at times t_{10} and t_{20} but decreased at t_{35} and t_{45} . This behavior could be related to the grain size (small).

The viscosity of retrogradation presented a behavior similar to the maximum viscosity, that is, a decline to t_{10} nixtamalization followed by an increase to t_{45} time. The apparent decline between t_0 and t_{10} may have been caused by the initial changes, such as calcium absorption at time t_{10} . The increase was most noticeable in the Criollo corn that coincided with the characteristics of a soft corn. The average retrogradation viscosities of Mont41 and Criollo varieties were similar, the same as those of Mont360 and Mont363. After cooking starch recrystallizes or anneals to form new structures, which is known as retrogradation (Paredes López *et al.*, 2009). By extending time, viscosity also increased due to the effect of temperature, since as starch granules are heated, they capture more water and swell (Corn Refiners Association, 2006); Rodríguez *et al.*, 2008; Vaclavik and Christian, 2008).

Thermal properties of corn flour untreated (t_0) and nixtamal flours (t_{10-45})

The highest average temperature of gelatinization was found in Mont41 and Mont360 varieties, whereas the lowest was in Criollo, and these values are consistent with those reported by Ruiz-Gutiérrez *et al.* (2010). The temperature at which starch is gelatinized depends on the concentration of starch, suspension pH, heating and the specific procedure rate (Corn Refiners Association, 2006). According to Pineda-Gómez *et al.* (2011), the gelatinization temperature tends to increase with the longer cooking time due to the increase of calcium content during nixtamalization. This explains the increase in temperature of gelatinization found after 45 minutes in all varieties. Besides, these values are

La entalpía mostró una tendencia opuesta respecto a la temperatura de gelatinización. Aquellas variedades con mayores requerimientos de energía para su nixtamalización tuvieron los menores valores de temperaturas de gelatinización. Esta tendencia fue similar en todas las variedades excepto el Criollo, que no mostró un cambio significativo en la entalpía en el tiempo. Este comportamiento puede estar relacionado con la composición de los gránulos de almidón. La proporción amilosa-amilopectina en el almidón del maíz tipo dentado varía de 25 % a 75 % (Salinas-Moreno *et al.*, 2003). Según Rojas-Molina *et al.* (2007), los gránulos de almidón de maíces con endospermo duro tienen una mayor proporción de amilopectina, mientras que los de endospermo suave tienen mayor proporción de amilosa lo cual afecta sus características térmicas.

Calor requerido comparado con el aportado por el combustible durante la cocción

Durante el proceso de nixtamalización hubo diferencias en las variables relacionadas con el consumo de combustible (Cuadro 6). El consumo de gas, el calor aportado por éste y calor requerido por cada variedad para el desprendimiento del pericarpio, dependió de la duración del calentamiento. Las variedades evaluadas, en promedio, requirieron 1323 kJ (Qreq; Cuadro 6) para llegar a la cocción y el calor que aportó el combustible (121 g aproximadamente) fue 5603.6 kJ en promedio (Qgas; Cuadro 6). Esto representó una pérdida promedio de 4280.6 kJ

consistent with those reported by Arámbula-Villa *et al.* (2001).

With respect to the enthalpy of gelatinization (ΔH), which is the energy required by grains of each variety for the process of gelatinization (Pineda-Gómez *et al.*, 2010), the variety that needed more energy was Mont363, followed by Criollo and Mont265; Mont41 and Mont360 had the lowest values (Table 5).

Enthalpy showed an opposite trend regarding the gelatinization temperature. Those varieties with higher energy requirements for nixtamalization had lower values of gelatinization temperatures. This trend was similar in all varieties except Criollo, which showed no significant change in enthalpy over time. This behavior can be related to the composition of the starch granules. The amylose-amylopectin proportion in starch of serrated type corn ranges from 25 % to 75 % (Salinas-Moreno *et al.*, 2003). According to Rojas-Molina *et al.* (2007), the corn starch granules of hard endosperm have a higher proportion of amylopectin, whereas those of soft endosperm have a higher proportion of amylose, which affects their thermal characteristics.

Heat required compared to that provided by fuel during cooking

During nixtamalization there were differences in the variables related to fuel consumption (Table 6). Gas consumption, the heat provided by the latter and heat required for each variety to reach the

Cuadro 6. Variables de la nixtamalización del grano de maíz de cinco variedades.
Table 6. Variables of the nixtamalization of corn grain of five varieties.

Variedad	Tiempo (min)	Qreq (kJ)	Qgas (kJ)	Gas (g)	Pérdidas (kJ)
Mont41	38.33±2.89a	1488.27±80.93a	5932.11a	128.12±3.84a	4443.84
Mont360	36.67±2.89a	1400.54±32.02a	5829.48a	125.91±3.84a	4428.94
Mont363	31.67±2.89ab	1368.1±138.54a	5521.58ab	119.26±3.84ab	4153.48
Mont265	31.67±2.89ab	1266.43±89.14ab	5521.58ab	119.26±3.84ab	4255.15
Criollo	26.67±2.89b	1091.8±152.72b	5213.69b	112.61±ab	4121.89

Promedios ± desviación estándar. Promedios con letras diferentes en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$). Promedio de calor de cocción por variedad. Tiempo: tiempo requerido durante la cocción del grano; Qreq: calor que requirió cada variedad durante la nixtamalización; Qgas: calor aportado por el gas; Gas: consumo de gas durante la nixtamalización ♦ Mean ± standard deviation. Means with different letters in a column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). Average heat cooking per variety. Time: time required for cooking the grain; Qreq: heat required by each variety during nixtamalization; Qgas: heat supplied by gas; Gas: gas consumption during nixtamalization.

(76.3 %) (Pérdidas; Cuadro 6) del calor total aportado por el combustible. Aunque esto está relacionado con la configuración del sistema de cocimiento usado en nuestro estudio para realizar la nixtamalización (nixtamalización tradicional), se detectó que un mayor tiempo de cocción implica pérdidas mayores de combustible. La variedad que requirió mayor tiempo de cocción fue Mont41, seguida por Mont360, Mont265 y Mont363 que tuvieron un intervalo de tiempo de 26.67 a 31.67 min (Cuadro 6). Criollo necesitó menor tiempo de cocción y tuvo una diferencia de 5 min con Mont41 (la variedad que requirió mayor tiempo). La diferencia de tiempo de cocción entre estas dos últimas variedades originó una pérdida de 321.95 kJ. Según Rodríguez *et al.* (2008), las características de calidad, las propiedades físicas, químicas y tecnológicas pueden influir en el procesamiento de los granos y están relacionadas con el índice de flotación, el peso hectolitrico y la absorción de agua. Con esta base se explica el comportamiento de la variedad Mont41 que requirió mayor tiempo de cocción, comparada con Criollo que fue más suave.

CONCLUSIONES

El consumo de combustible para la nixtamalización de maíz depende de varios factores. La dureza del grano es un factor importante, aunque el tamaño de grano y la velocidad de absorción de agua tienen una importancia similar. La fuerza de corte del nixtamal y el pH del nejayote se redujeron a través del tiempo en todas las variedades. Las propiedades reológicas de las harinas durante el proceso de nixtamalización mostraron comportamientos similares excepto en Mont265 cuyo grano fue más pequeño. Las propiedades térmicas de las harinas también fueron similares, con un aumento en la temperatura de gelatinización en las muestras tomadas al final de la nixtamalización. La cantidad de calor requerida para la cocción fue menor para variedad de menor dureza (Criollo) y fue mayor para Mont360 y Mont41. El menor consumo de gas durante la cocción se debió a una rápida absorción de agua y una menor dureza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), del CINVESTAV, unidad Querétaro, del Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba

removal of the pericarp depended on the duration of heating. The varieties evaluated required on average 1323 kJ (Q_{req} ; Table 6) to reach cooking, and the heat provided by the fuel (approximately 121 g) was on average 5603.6 kJ (Q_{gas} ; Table 6). This represented an average loss of 4280.6 kJ (76.3 %) (Losses; Table 6) of the total heat supplied by the fuel. Although this is related to the system cooking configuration used in our study for nixtamalization (traditional nixtamalization), we found that a longer cooking time implies a higher fuel loss. The variety requiring a longer cooking time was Mont41, followed by Mont360, Mont265 and Mont363 which had a range of time from 26.67 to 31.67 min (Table 6). Criollo required less cooking time and had a difference of 5 min with Mont41 (the variety that required the longest time). The cooking time difference between the last two varieties resulted in a loss of 321.95 kJ. According to Rodríguez *et al.* (2008), quality characteristics, physical, chemical and technological properties can influence the grain processing and are related to factors such as flotation index, test weight and water absorption. On this basis the behavior of the Mont41 variety is explained as it required a longer cooking time, compared to Criollo, which was softer.

CONCLUSIONS

Fuel consumption for corn nixtamalization depends on several factors. Grain hardness is an important factor, though the grain size and speed of water absorption are also important. The cutting force of nixtamal and nejayote pH decreased over time in all varieties. The rheological properties of flours during nixtamalization showed a similar behavior except in Mont265 variety whose grain was smaller. The thermal properties of flours were also similar, with an increase in the gelatinization temperature in the samples taken at the end of nixtamalization. The amount of heat required for cooking was lower for the variety of lesser hardness (Criollo) and higher for Mont41 and Mont360 varieties. The lower consumption of gas during cooking was due to a rapid water absorption rate and lower hardness.

—End of the English version—



y de las líneas prioritarias de investigación LPI-12 (Agregación de Valor) y LPI-13 (Comunidades agrarias, ejidos y conocimiento local) por las facilidades y financiamiento para la realización de la investigación.

LITERATURA CITADA

- AACC (American Association of Cereal Chemists). 2000. Approved Methods of Analysis. 10th ed. American Association of Cereal Chemists St. Paul, MN. 1200 p.
- Arámbula-Villa, G., L. Barrón-Ávila, J. González Hernández, E. Moreno-Martínez, y G. Luna-Bárceñas. 2001. Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (*Zea mays* L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. *ALAN* 51: 1-10.
- ASAE/ASABE (American Society of Agricultural Biological Engineers) Standards. 1999. Thermal Properties of Grain and Grain Products. 511 p.
- Bibat, M.A.D.R., O. M. De Rosario, L. E. Mopera, L. S. Collado, and F. P. Flores. 2014. Characterization of alkaline-cooked quality protein maize as raw material for noodle processing. *Philippine Sci. Lett.* 7: 413-419.
- Bishop C, F. H., and W. F. Maunder 1980. Potato Mechanisation and Storage. Farming Press Limited. Suffolk, United Kingdom. 205 p.
- Billeb de Sinibaldi, A. C., y R. Bressani. 2001. Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. *Arch. Lat. Am. Nutr.* 51: 86-94.
- Blandino, M., M.C. Mancini, A. Peila, L. Rolle, F. Vanara, and A. Reyneri 2010. Determination of maize kernel hardness: comparison of different laboratory tests to predict dry-milling performance. *J. Sci. Food Agric.* 90: 1870-1878
- Bressani, R. 2008. Cambios nutrimentales en el maíz inducidos por el proceso de nixtamalización. *In: Rodríguez-García, M. E., S. O. Serna-Saldívar, y F. Sánchez-Sinencio* (eds). Nixtamalización del Maíz a la Tortilla. Aspectos Nutrimentales y Toxicológicos. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. pp:19-80.
- Corn Refiners Association. 2006. Corn starch. 1701 Pennsylvania Avenue, N.W. Washington, D.C. 41 p.
- Cornejo-Villegas, M. A., A. I. Hernández-Samano, E. Gutiérrez-Córtes, A. Rojas-Molina, y M. E. Rodríguez-García. 2008. Establecimiento del tiempo de cocción de granos de maíz variedad QPM H368C con parámetros fisicoquímicos. *In: Sánchez E., L. A., D. G. Espinoza A., y M. E. Rodríguez-García*. Memorias del Tercer Congreso de Nixtamalización: Del Maíz a la Tortilla. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. pp: 24-29.
- Fernández-Muñoz, J. M., I. Rojas-Molina, M. I. González-Dávalos, M. Leal, M. I. Valtierra, E. San Martín-Martínez, and M. E. Rodríguez. 2004. Study of calcium ion diffusion in components of maíz kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chem.* 81: 65-69.
- Fernández-Muñoz J. L., E. San Martín-Martínez, J. A.I. Díaz-Góngora, A. Calderón, A. Alvarado-Escobar, H. Ortiz-Cárdenas, and M. Leal-Pérez. 2006. Steeping time and cooking temperature dependence of calcium ion diffusion during microwave nixtamalization of corn. *J. Food Eng.* 76: 568-572.
- González R., E. Reguera, J. M. Figueroa, and F. Sánchez-Sinencio. 2005. On the nature of the Ca binding to the hull of nixtamalized corn grains. *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.* 38: 119-124.
- Gómez H. M., C. M. McDonough, L. W. Rooney, and R. D. Waniska. 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *J. Food Sci.* 54: 330-336.
- Gutiérrez, E., I. Rojas-Molina, J. L. Pons-Hernandez, H. Gúzman, B. Aguas-Angel, J. Arenas, P. Fernández, A. Palacios-Fonseca, G. Herrera, and M. E. Rodríguez. 2007. Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. *Cereal Chem.* 84: 186-194.
- Ibarra-Mendivil, M. H., Y. T. Gallardo-Navarro, P. I. Torres, and B. Ramírez Wong. 2008. Effect of processing conditions on instrumental evaluation of nixtamal hardness of corn. *J. Texture Studies* 39: 252-266.
- Kniep K. R., and S. C. Mason. 1989. Kernel breakage and density of normal and opaque-2 maize grain as influenced by irrigation and nitrogen. *Crop Sci.* 29: 158-163.
- Lee, E. A., J. A. Young, J. A. Frégeau-Reid, and B. G. Good. 2012. Genetic architecture underlying kernel quality in food-grade maize. *Crop Sci.* 52: 1561- 1571.
- Martínez-López, A. L., E. Carvajal-Millan, J. Lizaldi-Mendoza, A. Rascón-Chu, E. Salas-Muñoz, and Y. López-Franco. 2011. Maize nixtamalization process as a source of gel forming ferulated arabinoxylans. *In: Quintero R., A., y D. A. Camacho* (eds). Memoria Simposium Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el Procesamiento de Maíz. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México. pp: 83-89.
- Méndez-Montealvo, G., F. J. García-Suárez, O. Paredes-López, and L. A. Bello-Pérez. 2008. Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *J. Cereal Sci.* 48: 420-425.
- Milán-Carrillo, J., R. Gutiérrez-Dorado, E. O. Cuevas-Rodríguez, J. A. Garzón-Tiznado, and C. Reyes-Moreno. 2004. Nixtamalized flour from quality protein maize (*Zea mays* L). optimization of alkaline processing. *Plant Foods Human Nutr.* 59: 35-44.
- Paredes López, O., F. Guevera Lara, y L. A. Bello Pérez. 2009. La nixtamalización. *Ciencias:* 60-70.
- Pineda-Gómez, P., D. Coral, M. L. Arciniegas, A. Rosales-Rivera, y M. E. Rodríguez García. 2010. Papel del agua en el almidón del maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. *Ing. Ciencia* 6: 129-141.
- Pineda-Gómez, P., D. Coral, D. Ramos-Rivera, A. Rosales-Rivera, y M. E. Rodríguez-García. 2011. Estudio de las propiedades térmicas de harinas de maíz producidas por tratamiento térmico-alcálico. *Ing. Ciencia* 1: 119-142.
- Rangel-Meza, E., A. Muñoz Orozco, G. Vazquez-Carrillo, J. Cuevas-Sánchez, J. Merino-Castillo, y S. Miranda-Colin. 2004. Nixtamalización, elaboración y calidad de tortilla de maíces de Ecatlán, Puebla, México. *Agrociencia* 38: 53-61.
- Rodríguez G., M. E., S. O. Serna S., y F. Sinencio S. 2008. Nixtamalización del Maíz a la Tortilla. Aspectos Nutrimentales y Toxicológicos. Universidad de Querétaro. Series Ingeniería. México. i.e. 300 p.
- Ruiz-Gutierrez, M. G., A. Quintero-Ramos, C. O. Meléndez-Pizarro, D. Lardizábal-Gutierrez, Barnard J., R. Márquez-

- Melendez, y R. Talamás-Abbud. 2010. Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. *J. Food Eng.* 98: 76-83.
- Rojas-Molina, I., E. Gutierrez-Cortez, A. Palacios-Fonseca, Baños, L., J. L. Pons-Hernandez, S. H. Guzmán-Maldonado, P. Pineda-Gomez, and M. E. Rodríguez. 2007. Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chem.* 84: 304–312
- Sahai, D., and D. S. Jackson. 2001. A novel enzymatic nixtamalization process for producing corn masa flour. *Cereal Foods World* 45: 240-245
- Salinas M., Y., P. Pérez H, J. Castillo M, y L. A. Álvarez R. 2003. Relación de amilosa: amilopectina en el almidón de harina nixtamalizada de maíz y su efecto en la calidad de la tortilla. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 115 – 121
- Salinas-Moreno, Y., y L. Aguilar-Modesto. 2010. Efecto de la dureza del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre el rendimiento y calidad de la tortilla. *Ing. Agríc. Biosist.* 5-11.
- Shandera, D. L., and D. S. Jackson. 2002. Corn kernel structural integrity: analysis using solvent and heat treatments. *Cereal Chem.* 79: 308–316.
- Statistical Analysis System (SAS). 2002. Software (V.9.0). User's Guide. N. C., USA.
- Sefa-Dedeh, S., B. Cornelius, D. Sakyi-Dawson, and E. Ohene-Afoakwa. 2004. Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chem.* 86: 317-324.
- Secretaría de Economía, Dirección General de Industria Básicas. 2012. Análisis de la Cadena de Valor Maíz-Tortilla: Situación Actual y Factores de Competencia Local. http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/20120411_analisis_cadena_valor_maiz-tortilla.pdf (Consulta: Marzo 2014)
- Vaclavik, V. A., and W. E. Christian. 2008. Starch Structure and Composition. Springer. Dallas, Texas, USA. pp: 50-54.
- Vázquez Carrillo, M. G., D. Santiago Ramos, Y. Salinas Moreno, I. Rojas Martínez, J. L. Arellano Vázquez, G. A. Velázquez Cardelas, y A. Espinoza C. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla en híbridos de maíz en valles altos de Tlaxcala, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 229-237.
- Wichser, W. R. 1961. The world of corn processing. *Am. Miller Process.* 89: 29.