

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

Arámbula Villa Gerónimo, Barrón Ávila Laura, González Hernández J., Moreno Martínez Ernesto y Luna Bárcenas Gabriel

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Unidad Querétaro-México,
Universidad Autónoma de Querétaro

RESUMEN. La tortilla es uno de los alimentos más importantes en México y algunos países de Centroamérica. La gran mayoría de las tortillas consumidas en México se elaboran con masa de maíz procesado por el método tradicional de nixtamalización, el cual incluye las etapas de cocimiento y reposo. Durante estas etapas las propiedades fisicoquímicas y estructurales del grano se ven fuertemente afectadas, provocando cambios en las propiedades de la tortilla producida. En este trabajo se evaluaron los cambios en la humedad, viscosidad máxima, almidón dañado y cristalinidad en grano, masa y tortillas; adhesión y pérdida de peso en masas; y rolabilidad, elasticidad y fuerza al corte en tortillas, en función del tiempo de cocimiento y reposo, manteniendo constantes las condiciones de molienda y cocimiento de la tortilla. Se observó que la humedad del grano aumentó hasta 42 g/100g durante el tiempo total de cocimiento (45 min), y alcanzó un máximo (52-53 g/100 g) al someterlo a reposo durante 4 h. Las tortillas de todos los tratamientos mostraron buena rolabilidad. Todos los parámetros evaluados presentaron altos coeficientes de correlación con las propiedades de textura, medidas objetivamente, de las tortillas. El almidón dañado, fue la variable que mejor se correlacionó con el resto de las propiedades evaluadas, presentando altos coeficientes ($R > 0,92$, $p < 0,01$) con la humedad, viscosidad máxima y pérdida de peso, del grano, masa y tortillas producidas. Las tortillas con mejores características fueron las elaboradas con nixtamal con las siguientes características: humedad, nixtamal, 42-44 g/100 g, tortilla, 43-44 g/100 g; adhesividad de masa, 30-50 g; viscosidad máxima, nixtamal, 860-880 cp, tortilla, 490-510 cp; almidón dañado, nixtamal 14 g/100 g, tortilla, 35-37 g/100 g y pérdida de peso de masa a tortilla, 16 g/100 g.

Palabras clave: Tortilla, nixtamalización, maíz.

SUMMARY. Effects of cook and steep time of nixtamalized corn grain (*Zea mays L.*) on the physicochemical, rheological, structural and textural characteristics of grain, masa and tortillas. The corn tortilla is elaborated using corn grain masa processed by the traditional nixtamalization method, which consists of two steps: cooking and steeping. In these steps the physicochemical and structural properties are strongly affected, resulting in changes in the textural characteristics of the tortilla produced. In this work the effects of cooking and steeping time on the moisture content, amylographic profiles, crystallinity, weigh loss from masa to tortilla, starch damage, rollability, elasticity and cutting force for grain, masa and corn tortillas, were evaluated. The milling of the nixtamalized grain and the cooking of tortilla conditions were the same in all treatments. All tortillas samples showed a good rollability. The results show that the moisture content of corn grain was increased up to 42 g/100 g during the total cooking time (45 min), and it further increased to 52-53 g/100 g after when the cooked grain was steeped for 4h. All evaluated parameters showed high correlation coefficients with the texture properties of tortillas. The starch damage was the variable with the best correlation among all evaluated parameters. The correlation coefficients between starch damage and moisture content, weigh loss and maximum viscosity for corn grain, masa and tortillas were larger than 0,92 ($p < 0,01$). The best tortillas were produced using nixtamal with the follow characteristics: moisture content of nixtamal, 42-44 g/100 g and tortilla, 43-44 g/100 g; adhesiveness of masa, 30-50 g; maximum viscosity of nixtamal, 860-880 cp and tortilla 490-510 cp; starch damage of nixtamal, 14 g/100 g and tortilla, 35-37 g/100 g, and weigh loss of tortilla during cooking, 16 g/100 g.

Key words: Tortilla, nixtamalization, corn.

INTRODUCCION

El proceso de nixtamalización se ha empleado desde tiempos remotos para preparar la tortilla, uno de los alimentos

más importantes para la población de Meso América (1). Este proceso consiste en el cocimiento del grano de maíz en abundante agua, 1 kg de grano de maíz por 2 a 3 L de agua, adicionada con un álcali, preferentemente $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y

sometido a temperaturas ligeramente menores a la de ebullición, durante 30 a 45 minutos, dependiendo de la dureza del maíz (>dureza >tiempo). Después del cocimiento, el grano cocido se deja reposar entre 12 y 14 horas en la solución alcalina. La solución alcalina, denominada nejayote, se desecha y el grano se lava ligeramente. Este producto se denomina nixtamal. El nixtamal se muele en molinos de piedras y se obtiene la masa. Esta se moldea en forma de discos aplanados de 12 a 18 cm de diámetro y entre 2 a 3 mm de espesor, después se cuece, colocándola sobre una superficie caliente (260-320°C) denominada comal, durante 27 s por un lado, se voltea y se deja durante 27 s, se vuelve a exponer por el primer lado, se deja durante el tiempo suficiente para que infle, momento en el que se retira del comal. La importancia de este alimento ha sido evaluada por muchos investigadores (2), los cuales han reportado infinidad de bondades entre las que se encuentran el aumento en la biodisponibilidad de las proteínas y del calcio (3).

Durante el cocimiento del grano se originan reacciones bioquímicas, entrecruzamientos e interacciones moleculares que modifican tanto las características fisicoquímicas, estructurales y reológicas de la masa, como las propiedades estructurales y de textura de la tortilla producida (4). Un alto porcentaje de estos cambios se debe a modificaciones en la estructura del almidón, principal componente químico del maíz con un 72-73 g/100 g (5). A diferencia de la masa de trigo, donde las propiedades reológicas, estructurales y de textura se modifican atendiendo a los cambios que se producen en las proteínas que lo forman, en el maíz es el almidón el que más influye en dichos cambios. Después de elaborado el nixtamal, se muele para convertirlo en masa. La masa obtenida de esta forma es una mezcla de material cocido en diferentes grados (6), la cual desarrolla propiedades de cohesión y adhesión características. En esta investigación se evaluaron las propiedades fisicoquímicas, reológicas y estructurales del grano durante el cocimiento y reposo, y las características fisicoquímicas, estructurales y texturales de la masa y las tortillas elaboradas con el nixtamal producido.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Se utilizó grano de maíz blanco grado alimenticio. La solución de cocimiento se hizo utilizando cal Ca(OH)_2 grado alimenticio (El topo, Monterrey, N.L, México) y agua electropura comercial.

Métodos

Elaboración de nixtamal

En un recipiente se colocaron 9 L de agua con 0,1 g/100 g de cal Ca(OH)_2 , y se calentó hasta 92°C. Se adicionó 3 kg

de grano crudo de maíz. Se mantuvo a 92°C, hasta cocimiento del grano (45 min). Después de este tiempo, el nixtamal se retiró del fuego y se dejó reposar durante 12 h. Se tomaron muestras de grano desde el inicio del cocimiento hasta el final del reposo. Durante el cocimiento se tomaron muestras cada 10 min, y durante el reposo, cada 20 min al inicio y más espaciados posteriormente. Se hicieron tres repeticiones de todo el proceso y se tomaron varias muestras a cada tiempo predeterminado.

Elaboración de masa

La masa con características adecuadas para formar tortillas fue obtenida con nixtamal con más de 45 min de proceso (inmediatamente después del cocimiento y muestras con reposo). De los tratamientos de maíz con tiempos de cocimiento de 45 min y mayores, se tomaron muestras de 1 kg. De este kilogramo se tomaron 500 g y se hicieron algunas determinaciones. El resto se molió en un molino de piedras (FUMASA, mod. US-25) y se adicionó el agua suficiente hasta obtener masa con buena consistencia para elaborar tortillas. Se determinó la textura de la masa y se elaboraron las tortillas.

Elaboración de tortillas

Las masas adecuadas para hacer tortillas, se amasaron durante tres minutos y se troquelaron en una máquina tortilladora manual de rodillo (Casa Herrera, México). Las características físicas de las tortillas fueron: diámetro 12 cm; espesor, 1,85 mm; y peso de 28 ± 2 g. Las tortillas se sometieron a cocimiento en un comal metálico, a 260-320°C, utilizando los siguientes tiempos: 25 s por un lado, 26 por el otro lado y hasta inflar por el primer lado. Seis tortillas de cada tratamiento se colocaron en servilletas de tela y se guardaron para analizarlas 30 min después de elaboradas. El resto se almacenaron a temperatura ambiente, envueltas en servilleta de tela, para analizarlas 12 h después de elaboradas, previo calentamiento en un horno de microondas (Gold Star, mod. MA-1465M) a plena potencia por 3 minutos.

Humedad del nixtamal y tortillas

La humedad del nixtamal y las tortillas se determinó utilizando la técnica 22-45 de la AACC (7). Se tomaron 2 g de muestra previamente molidas en un molino (Braun, tipo 4-041, mod. KSM-2) y se colocaron en una estufa de secado (Felisa, mod. FE-2434) durante 2 h a 135°C. La humedad se obtuvo por la diferencia de peso antes y después de deshidratado el material.

Viscosidad máxima (RVA)

Esta determinación se obtuvo de grano nixtamalizado, deshidratado y molido. Se realizó utilizando el equipo Rapid Visco Analyzer (RVA-3D). Se colocaron 3 g de muestra,

ajustadas a 14 g/100 g, de humedad, y suficiente agua hasta completar 28 g. Se obtuvieron las curvas aplicando un ciclo de calentamiento y enfriamiento de la forma siguiente: inició en 50°C, permaneció en esta temperatura por un minuto, enseguida se aplicó una rampa de elevación de temperatura de 7,5°C/min hasta alcanzar 92°C, permaneció en esta temperatura durante 5 min, luego enfrió con la misma razón del calentamiento (7,5°C/min) hasta 50°C, permaneció a 50°C durante 1 min y terminó la prueba a los 22 min. De la curva se obtuvo la viscosidad máxima desarrollada en centipoises.

Difracción de rayos-x y porcentaje de cristalinidad

Para estas determinaciones se utilizó un difractómetro de rayos-x, marca Perkin-Elmer, modelo 234. Se tomaron muestras de material molido (grano, nixtamal, masa y tortilla) y se pasó por la malla No. 60 (Mont Inox USA). Se colocaron en el portamuestras y se hizo el barrido desde 20 hasta 60° en la escala 2θ . Para obtener el porcentaje de cristalinidad se obtuvo el área total bajo la curva de difracción, incluyendo los picos, y se restó el área correspondiente a la difracción no-coherente. El área de los picos del maíz crudo se consideró como el 100% de cristalinidad.

Porcentaje de almidón dañado

Esta determinación se hizo de acuerdo al método 76-31, AACC (7). Se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible, marca Perkin-Elmer, modelo Lambda 3.

Adhesividad de masas

Este parámetro se obtuvo utilizando el equipo Texture Analyzer TA-XT2 (Texture Technologies Corp., Scardale, N.Y./Stable Micro System, Godalming, Surrey, U.K.) con el accesorio TA-90 (esfera de acero inoxidable, 4 mm de diámetro). Las condiciones de prueba fueron: velocidad de desplazamiento, 2 mm/s, distancia de trayectoria, 3 mm. Las muestras de masa, moldeadas en forma de anillo de 12 mm de alto y 70 mm de diámetro se colocaron en una superficie metálica lisa, y se hizo introducir el accesorio del texturómetro. Se obtuvo la fuerza a la adhesión (tensión) en gramos fuerza.

Pérdida de peso durante el cocimiento de la tortilla

Este parámetro se determinó calculando el porcentaje en peso del material perdido durante el cocimiento de la masa a tortilla, pesando la tortilla antes y después de cocida, en una balanza granataria de triple brazo (Ohaus, cap. 2200 g). Se reportó en porcentaje en peso.

Pruebas de textura de tortillas

Rolabilidad

La rolabilidad de las tortillas, capacidad que tienen las tortillas para hacerse en forma de taco sin que se rompan, se

determinó usando el método propuesto por Bedolla (8). La tortilla completa, 30 min después de elaborada, se enrolló alrededor de una varilla de vidrio de 2 cm de diámetro y se observó el grado de rompimiento. El grado de rompimiento de las tortillas se evaluó en forma subjetiva utilizando una escala del 1 al 5, donde 1 correspondió a un rompimiento de 0%, 2, a un rompimiento de 1 a 25%, 3, de 26 a 50%, 4, de 51 a 75% y 5 desde 76 a 100% de rompimiento de la longitud de la tortilla.

Elasticidad y corte

Para la prueba de elasticidad se cortó una tira, en forma de probeta ("I"), de la parte central de la tortilla, evitando los bordes. Las dimensiones de la tira fueron 3,5 x 2 cm, y 1,8 cm en la parte delgada de la tira. La prueba de elasticidad se obtuvo utilizando el equipo Texture Analyzer TA-XT2, con el accesorio TA-65. Este accesorio son unas pinzas de retención en las que se colocó la tira de tortilla y se sometió a tensión hasta lograr el rompimiento. De la curva resultante se obtuvo la pendiente desarrollada hasta el punto de rompimiento, considerándose ésta última como la elasticidad de la tortilla (>valor <elasticidad). Las condiciones de prueba fueron: velocidad 2 mm/s, distancia de tensión, 15 mm. Para las determinaciones de corte se utilizó el mismo equipo con el accesorio TA-34, el cual es una cuchilla plana de 10 cm de largo por 4 mm de ancho. Para esta prueba se utilizaron las mismas tiras de tortillas utilizadas en las pruebas de elasticidad, realizando el corte en la parte central de la forma. Las condiciones para esta prueba fueron: velocidad 2 mm/s, distancia de compresión, 15 mm.

Análisis estadístico

Para el estudio de la cinética de cocimiento y reposo se utilizaron los siguientes tiempos: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 120, 180, 300, 540 y 1440 min. Se hicieron tres repeticiones de todo el proceso y al menos dos mediciones por cada tiempo preestablecido. El análisis de datos para obtener las medias y desviaciones estándar se hizo utilizando el paquete estadístico SAS (9).

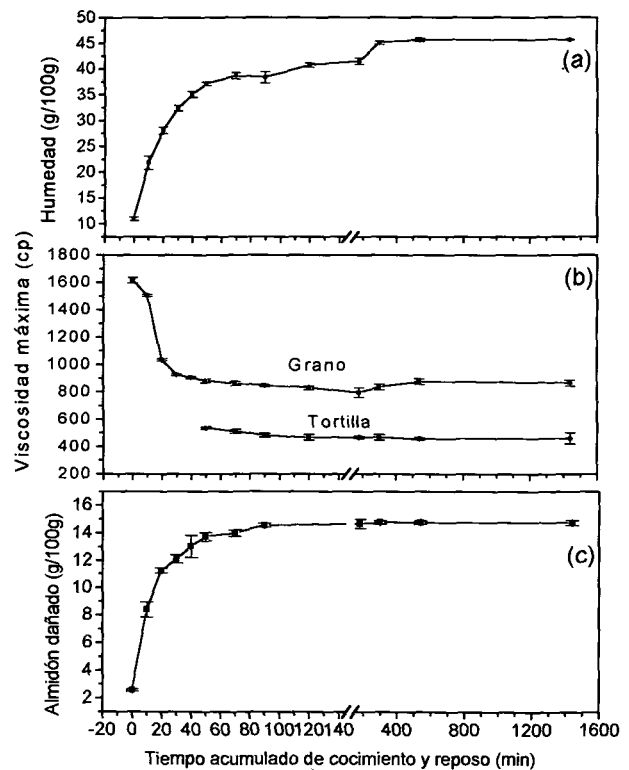
RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se presentan la humedad, la viscosidad máxima desarrollada y el porcentaje de almidón dañado del grano de maíz en función del tiempo acumulado de cocimiento y reposo para la producción de masa nixtamalizada para elaborar tortillas. En la Figura 1a se observa un aumento de la humedad del grano durante el cocimiento (45 min) y parte del reposo. Se puede observar que durante el cocimiento alcanzó una humedad máxima de alrededor de 37 g/100 g, y durante el reposo (después de los

primeros 45 min) aumentó en aproximadamente 10 /100 g, alcanzando una humedad total que se estabiliza en aproximadamente 47 g/100 g. Esta humedad es similar a la reportada por Serna-Saldivar et al. (2). La difusión del agua hacia el interior del grano es lenta, debido a la composición estructural del mismo, por lo que para lograr el aumento de humedad se requiere aplicar tiempos prolongados de reposo (10). El tiempo necesario para lograr la humedad de saturación en el grano de maíz cocido, osciló entre 4 y 5 h de reposo. La humedad del grano es un parámetro importante ya que las características de textura de las tortillas dependen, en un alto grado, de la humedad que logra el grano al nixtamalizarse (11). Al procesar el grano, inmediatamente después del tiempo de cocimiento, se obtuvieron masas y tortillas con textura no adecuada. En la Figura 1b se presenta la viscosidad máxima desarrollada por los tratamientos evaluados, del grano nixtamalizado y de tortillas elaboradas con éstos. Este parámetro está relacionado inversamente con el grado de gelatinización de los almidones. Un almidón, después de gelatinizado y deshidratado, al rehidratarse no desarrolla viscosidad, y por el contrario uno nativo tiende a desarrollar la viscosidad a su máxima capacidad. En esta figura se observa que al aumentar el tiempo de cocimiento, la viscosidad máxima desarrollada disminuyó hasta estabilizarse en aproximadamente 850 cp (materiales con más de 2 h de proceso). La gelatinización de los almidones se observa principalmente durante el tiempo de cocimiento (primeros 45 min), ya que es donde disminuyó fuertemente la viscosidad desarrollada por los materiales. Después de retirar el recipiente del fuego, como la mezcla (grano de maíz y nejayote) permaneció caliente, las reacciones de gelatinización continuaron hasta que dicha mezcla alcanzó temperaturas por debajo de 68-70°C, la cual es la temperatura de gelatinización del almidón del maíz. En la misma Figura se presenta la viscosidad máxima que desarrollaron las tortillas elaboradas con las masas obtenidas del maíz procesado con diferentes tiempos acumulados de cocimiento y reposo. Las tortillas presentaron la misma tendencia de viscosidad que el grano. En general, todos los valores determinados en las muestras de tortillas fueron menores que los encontrados en granos. Un comportamiento similar fue reportado por Rodríguez et al. (4). La disminución de la capacidad de desarrollar viscosidad de las masas antes y después de transformarlas en tortillas es producto de los procesos térmicos a que fue sometido el grano después de nixtamalizado: la molienda y el cocimiento de la tortilla, considerándose a este último como el más severo. La disminución de la viscosidad máxima fue de aproximadamente 43% por debajo que los mismos materiales en forma de nixtamal.

FIGURA 1

Humedad (a), viscosidad máxima (b) y almidón dañado (c) de grano nixtamalizado a diferentes tiempos acumulados de cocimiento y reposo. Valor promedio y error estándar de tres repeticiones con dos mediciones a cada tiempo



Una forma de evaluar la degradación de los almidones es mediante la determinación del almidón dañado. En la Figura 1c se presenta la evolución de la degradación del almidón durante el cocimiento y reposo del grano de maíz. En esta figura se puede observar que el almidón dañado aumentó rápidamente hasta estabilizarse en alrededor de 14 g/100 g, con una tendencia inversa al desarrollo de viscosidad. El daño del almidón fue debido principalmente a la gelatinización ocasionada por el cocimiento y el reposo aplicado al grano.

Las pruebas de textura de masa y tortillas se realizaron con los materiales con tiempos acumulados de cocimiento y reposo mayores de 60 min (45 min de cocimiento más 15 min de reposo), ya que las masas de grano con tiempos de proceso menores, no fue posible obtener tortillas. En la Figura 2a se presenta el comportamiento de la fuerza a la adhesión de las masas. En esta figura se puede observar que este

parámetro presenta un máximo para materiales con tiempos acumulados de cocimiento y reposo de 120 min. Después de este tiempo disminuye hasta estabilizarse después de 4 h. En las masas de maíz se requiere un rango de adhesividad para que el material se pueda troquelar (11). Un material sin adhesividad no presenta consistencia para formar la tortilla, y por el contrario una masa demasiado adhesiva (chiclosa) no permite formar la tortilla, ya que se pega al troquelador y no permite ser transportada al comal para su cocimiento. En este experimento, aunque las masas con mas de 60 y menos de 120 min de cocimiento y reposo, no tuvieron la consistencia adecuada, se procesaron y se obtuvieron tortillas para evaluar estos efectos en el producto final. Las masas elaboradas con nixtamal con tiempo total de cocimiento y reposo de 4 h y mayores, presentaron muy buenas características de adhesión para formar tortillas, ya que se maquinaron sin problema alguno.

Un parámetro importante, desde el punto de vista comercial, es el porcentaje de pérdida de agua durante el cocimiento de la tortilla, ya que se ve reflejado en el rendimiento total. En la Figura 2b se puede observar que las tortillas elaboradas con materiales con tiempos totales de cocimiento y reposo menores de 120 min presentaron los mayores porcentajes de pérdidas de agua durante el cocimiento de tortilla, estabilizándose este parámetro, después de este tiempo. Este efecto se debe probablemente a que estos tiempos de cocimiento y reposo son menores a los requeridos para que el agua penetre al grano e interaccione con el resto de los componentes. Esto permite un mayor ligamiento del agua evitando sea eliminada fácilmente durante el calentamiento.

Al analizar la rolabilidad se observó que todas las tortillas elaboradas con los materiales con más de 180 min de procesamiento de cocimiento y reposo, presentaron una calificación de 1 (buena rolabilidad), por lo que esta determinación subjetiva no arrojó diferencias entre los tratamientos evaluados.

En la Figura 3 se presentan los resultados de humedad de las tortillas elaboradas y sus principales características de textura, elasticidad y fuerza al corte. En la figura 3a se puede observar que, al igual que en el grano nixtamalizado, las tortillas producidas con masa de nixtamal procesado con los menores tiempos totales de cocimiento y reposo, presentaron la humedad más baja, menor de 40 g/100 g. La tortilla con muy baja humedad es quebradiza y con características de textura muy pobres. La humedad de las tortillas elaboradas con masa de nixtamal procesado con tiempos de cocimiento y reposo mayores de 180 min, alcanzó un máximo de 48 g/100 g, siendo adecuadas en textura. Se ha reportado una buena correlación entre las características de las tortillas y el contenido de humedad de las mismas, a mayor humedad

mejores características de textura (12). En la figura 3b y c se presentan los resultados obtenidos para las variables de textura de las tortillas producidas. En la figura 3b y 3c se puede observar que las tortillas con poco tiempo de proceso (< 120 min) presentaron poca elasticidad y requirieron altas fuerzas para su corte, esto es, son duras y con poca elasticidad. Estos parámetros se estabilizaron después de los 120 min. Las tortillas con tiempos de proceso mayores que 120 min presentaron características de textura adecuadas para ser consumidas. Este comportamiento establece que después del cocimiento del grano, este requiere un cierto tiempo de reposo para, además de absorber mayor humedad, desarrolle características de consistencia de masa adecuadas que se ven reflejadas en buenas características de textura de las tortillas producidas.

FIGURA 2

Adhesión (a) y pérdida de peso durante cocimiento de tortilla (b), de masas de grano nixtamalizado con diferentes tiempos acumulados de cocimiento y reposo. Valores promedio y error estándar de tres repeticiones y dos mediciones a cada tiempo

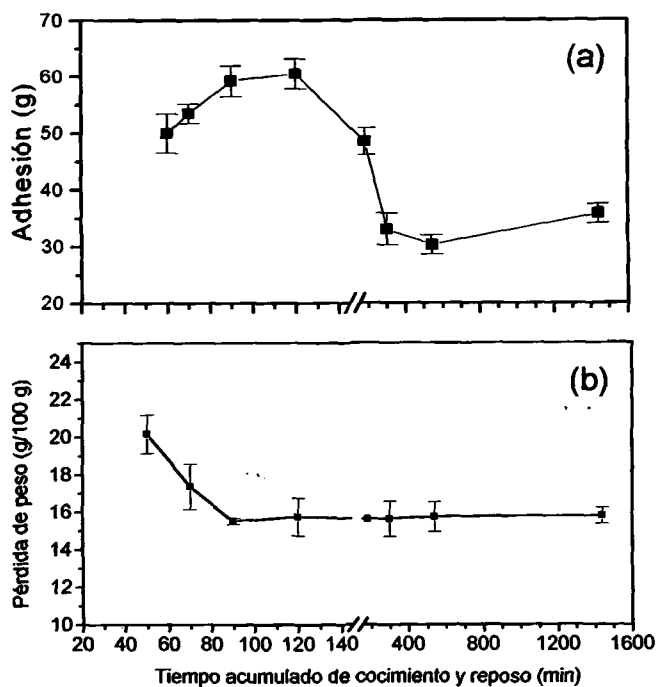
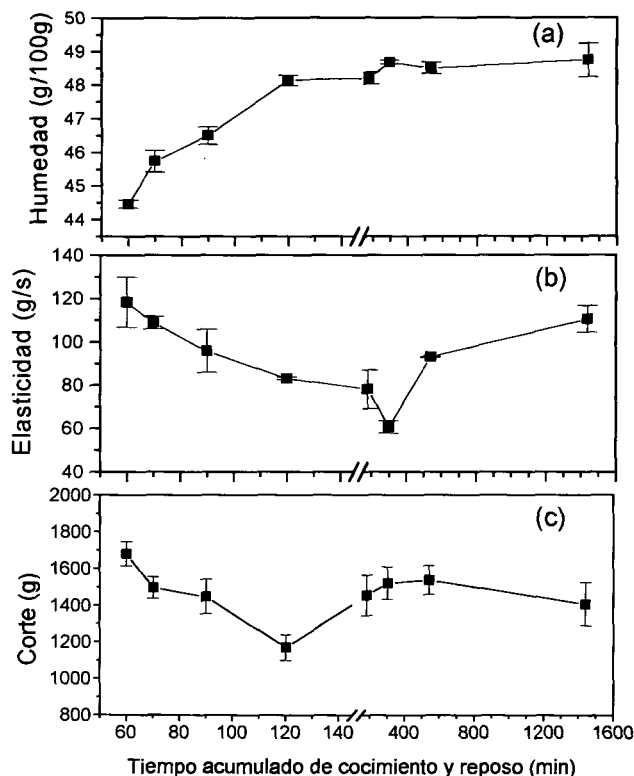


FIGURA 3

Humedad (a), elasticidad (b) y fuerza al corte (c) de tortillas de masas de grano nixtamalizados a diferentes tiempos acumulados de cocimiento y reposo. Valor promedio y error estándar de tres repeticiones con dos mediciones a cada tiempo

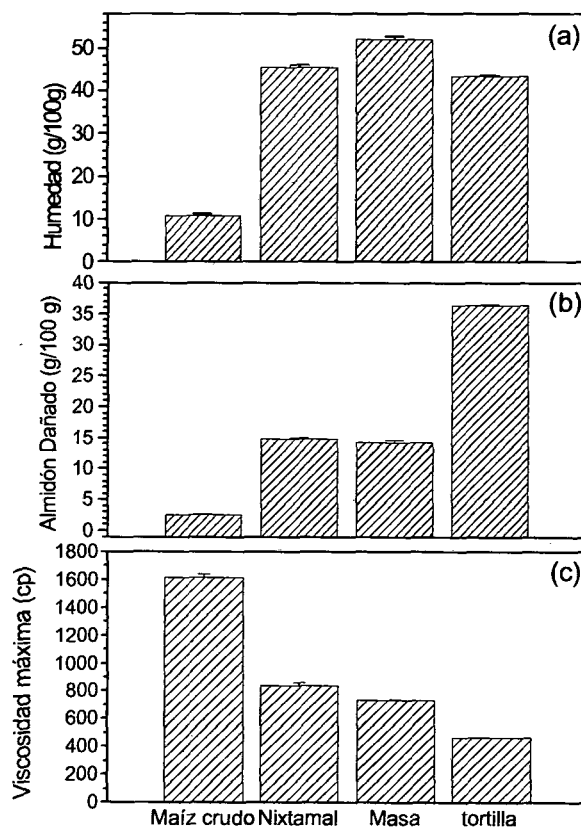


Al analizar la humedad que desarrolló el maíz durante las etapas de proceso en la producción de tortillas, desde grano hasta tortilla (Figura 4a), se puede observar que la mayor absorción de agua se presentó en la etapa de grano crudo a nixtamal, lográndose aumentar desde 12 g/100 g en maíz crudo, hasta 50 g/100 g después de 4h de tiempo total de cocimiento y reposo. El cambio de humedad de nixtamal a masa es poco ya que solo representa el agua que se adiciona para producir masa con la consistencia adecuada para formar la tortilla. Se observó una disminución de humedad cuando se transformó de masa a tortilla, debido a que la masa se sometió, en forma de tortilla, a cocimiento. Esta disminución de humedad fue por efectos de la evaporación del agua durante el tiempo en que la masa está en contacto con la superficie caliente (260-320°C). En el caso del almidón dañado (Figura 4b), se observó que un cierto porcentaje del daño, se ocasionó durante el cocimiento del grano, sin embargo, el mayor daño se produjo durante el cocimiento de la tortilla (transformación

de masa a tortilla). Durante esta última etapa todos los componentes de la masa, incluyendo los gránulos de almidón, están directamente expuestos al comal caliente, lo que les provoca un daño considerable. Durante el cocimiento del grano, este es expuesto a altas temperaturas en presencia de abundante agua por tiempos prolongados, sin embargo, la propia estructura compacta del grano actúa como un regulador del calor y del agua que ingresan al mismo. Para el desarrollo de viscosidad (viscosidad máxima), se observó (Figura 3c) que el mayor porcentaje en disminución se presentó al transformar el grano de maíz a grano nixtamalizado, debido a la gelatinización parcial de los gránulos de almidón durante el cocimiento y reposo. En las siguientes etapas, la gelatinización sufrida por los almidones y por consecuencia el desarrollo de viscosidad fue menor.

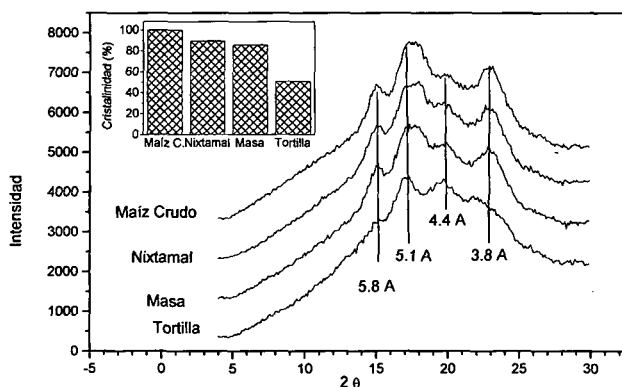
FIGURA 4

Humedad (a), almidón dañado (b) y viscosidad máxima (c) del maíz durante las etapas de procesamiento en la elaboración de la tortilla. Valor promedio y error estándar de tres repeticiones y dos mediciones por producto



En la Figura 5 se presentan los difractogramas de rayos-x y la cristalinidad del maíz durante las etapas del proceso de elaboración de tortillas. En esta figura se observa que todos los materiales presentaron los picos de difracción característicos del almidón de maíz. Para cada uno de los picos cristalinos se indica el espaciamiento planar correspondiente en 3,8; 4,4; 5,1 y 5,8 Å. También se puede observar que la cristalinidad del material disminuye conforme avanzan las diferentes etapas del proceso. Los picos correspondientes a 3,8; 5,1 y 5,8 Å, característicos de un almidón del tipo A, tienden a disminuir y el de 4,4 Å que corresponde a un almidón del tipo A+V se hace presente. Este comportamiento es acorde al reportado por Zobel (13), quien evidencia que al someter el almidón de tipo A, a un proceso térmico húmedo, este cambia a una estructura del tipo A+V. La mayor pérdida de cristalinidad se observó al pasar de masa a tortilla. Este parámetro concuerda con los resultados de viscosidad máxima presentados en este artículo, los cuales están asociados al grado de gelatinización de los gránulos de almidón del maíz. Al aumentar el grado de gelatinización disminuye tanto el grado de cristalinidad como la viscosidad máxima (12).

FIGURA 5
Difractogramas de rayos-x, y cristalinidad del maíz durante las etapas de proceso en la elaboración de la tortilla



Al correlacionar las variables evaluadas, la que presentó los más altos coeficientes, fue el almidón dañado. Al aumentar el porcentaje de almidón dañado, se elevó el contenido de humedad tanto en grano como en tortilla ($R = 0,94241$ $p < 0,0001$ y $R = 0,87812$ $p < 0,0001$), y se obtuvo la menor pérdida de peso durante el cocimiento de tortilla ($R = -0,81791$, $p < 0,0005$). Este comportamiento se debe probablemente al hecho de que al haber mayor daño del

gránulo de almidón, los enlaces hidroxilos de la amilosa y amilopectina quedan más expuestos y se enlazan fuertemente con las moléculas de agua (agua ligada). Esto hace que el gránulo retenga mayor cantidad de agua, pero menos disponible para reacciones bioquímicas, perdiéndose en menor cantidad al someter a cocimiento la tortilla, ya que como se sabe el agua no-ligada es la que primeramente se evapora. Además al elevar el porcentaje de almidón dañado disminuyó la viscosidad máxima desarrollada tanto del grano ($R = -0,91938$, $p < 0,0001$) como de la tortilla ($R = -0,86230$, $p < 0,0001$). Los almidones desarrollan su mayor viscosidad cuando están intactos. Al someterlos a tratamientos térmico-húmedos se gelatinizan y se refleja en un aumento en el porcentaje de almidón dañado, así como en la disminución del desarrollo de viscosidad al tratar de formar el gel.

CONCLUSIONES

Durante el cocimiento del grano de maíz se produce un aumento de humedad, la cual se eleva en 10 g /100 g más, durante el reposo. Durante el reposo se presentan los fenómenos de difusión del agua al interior del grano, lo que origina cambios bioquímicos en su estructura molecular que modifica las características fisicoquímicas, reológicas y texturales del nixtamal, masa y tortillas. Para obtener masas y tortilla con buenas características fisicoquímicas y de textura es necesario que el grano de nixtamal alcance la humedad de estabilización. Esto se logra con al menos 4 h de reposo después del periodo de cocimiento. Las características como la humedad, desarrollo de viscosidad y almidón dañado, presentan altas correlaciones entre sí y con las características de textura de las tortillas elaboradas. Las tortillas con las mejores propiedades de textura corresponden a materiales con las siguientes características: humedad, nixtamal 42-44 g/100 g, tortilla, 43-44 g/100 g; adhesión de masa, 30-50 g; viscosidad máxima desarrollada, nixtamal, 860-880 cp, tortilla, 490-510 cp; porcentaje de almidón dañado, nixtamal 14 g/100 g, tortilla, 35-37 g/100 g, y pérdida de peso de tortilla, 16 g/100 g,

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la participación de Gutiérrez A. E., Gaytán, M. M. y Hernández, M. A. por su asistencia técnica en parte de esta investigación.

REFERENCIAS

1. Reyes CP. El maíz y su cultivo. edit. AGT Editor S.A., 1ra. edición. México, D.F. 1990, p.85.
2. Serna-Saldívar SO, Gómez MH and Rooney L.W. Technology, chemistry and nutritional value of alkaline-cooked corn

- products. Cap. 4. En: *Advances in Cereal Science and Technology*. Vol. X., Y. Pomeranz (Ed.) American Association of Cereal Chemist. St. Paul MN. 1990, p. 243-307.
3. Trejo-González A, Feria-Morales A and Wild-Altamirano C. The roll of lime in the alkaline treatment of corn for tortilla preparation. En: *Adv. Chem. Series*. No. 198. Eds. R. E. Feeney and J. R. Whitaker. American Chemical Society. 1982, p. 245-263.
 4. Rodríguez ME, Yañez JM, Figueroa JDC, Martínez BF, González-Hernández J and Martínez-Montes JL. The influence of slaked lime content on the processing conditions of cooked maize tortillas: changes of Thermal, structural and rheological properties. *Z Lebensm Unters Forsch*. 1995;201:236-240.
 5. Inglett GE. *Corn: culture, processing, products*. ed. AVI Publishing Company, Inc., London, Eng. 1970. p.145.
 6. Gómez MH, Waniska RD and Rooney LW. Effects of nixtamalization on grinding conditions on the starch in masa. *Starch/Stärke* 1990;42: 475-482.
 7. American Association of Cereal Chemists. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. 8th ed. St. Paul MN. 1993. Vol. I y II. p. 296.
 8. Bedolla S. Development and characterization of instant tortilla flours from sorghum and corn by infra-red cooking (micronizing) and extrusion cooking. Ph. D. Dissertation, Texas, A&M University, College Station. 1983. p. 207.
 9. Statistical Analysis System (SAS). *SAS User's guide*. Version 6 edition the Institute Cary NC. 1989. p. 438.
 10. Vagenas GK and Karathanos VT. Predictions of Moisture Diffusivity in Granular Materials, with Special Applications to Foods. *Biotechnol. Prog.* 1991;7: 419-426.
 11. Ramirez-Wong B, Sweat VE, Torres PI. and Rooney LW. Cooking time, grinding, and moisture content effect on fresh masa texture. *Cereal Chem.* 1994;71: 337-343. 1
 12. Arámbula VG, Mauricio SRA, Figueroa JDC, González-Hernández J and Ordorica FCA. Corn Masa and Tortillas from Extruded Instant Corn Flour Containing Hydrocolloids and Lime. *Journal of Food Science*. 1999;64 (1):120-124.
 13. Zobel, H. F. Starch Crystal Transformation and their Industrial Importance. *Starch/Stärke*, 1998;40:1-4.

Recibido; 28-09-2000

Aceptado: 12-06-2001