



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

Efecto de la temperatura de fermentación y la adición de xantana sobre las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de pan blanco durante su envejecimiento

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA

MÓNICA GOSSET SOTO



MÉXICO, D.F.

AÑO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Marcos Francisco Báez Fernández**

VOCAL: **Profesor: Juan Diego Ortiz Palma Pérez**

SECRETARIO: **Profesor: Alberto Tecante Coronel**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Esmeralda Paz Lemus**

2° SUPLENTE: **Profesor: Mariana Ramírez Gilly**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Edificio de Alimentos y Biotecnología. Laboratorio 313 del Conjunto E de la Facultad de Química, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. ALBERTO TECANTE CORONEL

SUSTENTANTE:

MÓNICA GOSSET SOTO

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	9
ASPECTOS GENERALES	9
1.1 <i>El trigo</i>	9
1.2 <i>El pan</i>	10
1.2.1 <i>Funcionalidad de ingredientes</i>	10
1.3 <i>Xantana</i>	12
1.4 <i>Elaboración de pan</i>	14
1.5 <i>Envejecimiento del pan</i>	15
1.5.1 <i>Pérdida de humedad</i>	17
1.6 <i>Análisis de Perfil de Textura (APT)</i>	17
1.7 <i>Microcalorimetría de barrido diferencial</i>	19
HIPÓTESIS	20
OBJETIVOS	20
<i>General</i>	20
<i>Particulares</i>	20
CAPÍTULO 2	21
MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 <i>Materiales</i>	21
2.2 <i>Elaboración de pan</i>	22
2.3 <i>Humedad</i>	30
2.4 <i>Análisis del Perfil de Textura (APT)</i>	31
2.6 <i>Análisis estadístico</i>	32
CAPÍTULO 3	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
3.1 <i>Pérdida de Humedad</i>	34
3.2 <i>Análisis de Perfil de Textura</i>	41
3.2.1 <i>Dureza</i>	41

3.2.2	<i>Cohesividad</i>	49
3.2.3	<i>Masticabilidad y Gomosidad</i>	54
3.3	<i>Relación Humedad-Dureza</i>	61
3.4	<i>Microcalorimetria diferencial de barrido</i>	64
3.5	<i>Análisis de imágenes</i>	69
	CONCLUSIONES	72
	TRABAJO FUTURO	73
	REFERENCIAS	74
	ABREVIATURAS Y DEFINICIONES	78
	ANEXO 1	79
	ESPECIFICACIONES DE XANTANA KELTROL T[®]	79

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto de la temperatura de fermentación (30 y 40 °C) y la adición de xantana (0.0, 0.1 y 0.5%) sobre el envejecimiento de pan blanco. Se realizaron pruebas de humedad y análisis de perfil de textura cada tercer día sobre un periodo de diez días, y de microcalorimetría diferencial de barrido (μ CDB) al inicio del almacenamiento (día 0) y al final de éste (día 10) con la finalidad de observar los cambios fisicoquímicos que ocurren en el pan cuando se almacena en refrigeración. Fermentar a 40 °C produce un pan de poca altura y miga de celdas grandes y como consecuencia se acelera su envejecimiento. La adición de xantana, ayudó únicamente a disminuir la pérdida de humedad durante el almacenamiento. El aumento de la dureza se atribuyó a la pérdida de humedad y a la retrogradación de almidón dado que tanto la entalpía de transición térmica y como consecuencia también el porcentaje de cristalinidad, aumentaron durante el almacenamiento. La cohesividad de la miga está directamente relacionada con la humedad, ya que con el envejecimiento la miga se reseca y se agrieta. La masticabilidad y la gomosidad siguen el mismo comportamiento que la dureza con un crecimiento lineal por zonas. Esto muestra que la velocidad con la que ocurren estos cambios no es constante sino que cambia con el tiempo. En general, al inicio del almacenamiento la velocidad es mayor y tiende a disminuir o incluso a cero para tiempos de almacenamiento más largos dentro de la escala de tiempo de los experimentos.

ABSTRACT

The effect of fermentation temperature (30 and 40 °C) and addition of xanthan (0.0, 0.1 y 0.5%) on staling of white bread was assessed. Moisture and texture profile analysis tests were carried out each third day over a period of ten days, and differential scanning micro-calorimetry (μ DSC) tests were done at the beginning (day 0) and end (day 10) of storage in order to observe physicochemical changes that take place when bread is stored under refrigeration. Fermenting at 40 °C produces bread with less height, i.e. flattened to some degree, and crumb with big cells and as a consequence its staling is accelerated. Addition of xanthan, contributed only to reduce moisture loss during storage. The increase in hardness was attributed to moisture loss and starch retrogradation observed from the increase in both the enthalpy of thermal transition and the degree of crystallinity. Cohesivity of the crumb is directly related to moisture, as staling results in a dry and cracked crumb. The behavior of chewability and gomosity was practically the same of hardness with a linear increase with time divided into at least two zones. This shows the rate of change of these properties is not constant but depends on storage time. In general, at earlier stages of storage the rate of changes is high and tends to decrease or even to become zero for longer storage periods within the time scale of the experiments.

INTRODUCCIÓN

El trigo y el pan han acompañado a muchas civilizaciones a lo largo de toda su existencia en la tierra. La base de la alimentación de todas las culturas han sido los cereales, con el trigo como uno de los más importantes, como base de su alimentación y supervivencia, y el pan, siendo un producto de este grano tan importante, inclusive ha llegado a formar parte de representaciones artísticas en múltiples manifestaciones. Uno de los intercambios más importantes para el nuevo mundo, descubierto por Colón, fue la llegada del trigo a los valles de México (Serra, 2010). El pan ha representado un papel esencial en el desarrollo del género humano y constituye una de nuestras principales fuentes de alimentación.

Durante mucho tiempo el pan constituyó la base de todo el sistema administrativo, considerándose tanto una unidad de medida como monetaria. La fabricación de pan constituye un sofisticado proceso de cocción, que se ha incorporado hace relativamente poco tiempo a los métodos de conservación que utilizan el tratamiento térmico. Además, se considera la panificación como un proceso de aireación, ya que la singularidad de la harina de trigo permite que el pan presente una estructura esponjosa. Las proteínas del gluten del trigo son únicas ya que al mezclarse con agua forman una red viscoelástica capaz de retener el gas durante el esponjamiento (Dendy, 2004).

El consumo de pan en México inició a finales de la época colonial, ya que el trigo fue introducido por los españoles, en el mismo año de la conquista, 1524. Después, en el año 1525 se abrieron varias panaderías, lo que dio inicio a un aumento en el consumo de pan (García, 1989). Este trabajo tiene la finalidad de estudiar el efecto de las condiciones de proceso de elaboración de pan blanco y la adición de xantana sobre el cambio de las propiedades físicas y químicas del pan durante su almacenamiento, ya que un porcentaje importante de consumidores acostumbra comprar pan fresco “artesanal” y productos de pastelería frescos, como si recién salieran del horno (Euromonitor Internacional, 2009).

El objetivo de este trabajo es conocer el efecto de la temperatura de fermentación, la concentración de xantana, y el tiempo de almacenamiento sobre las propiedades mecánicas, y la estabilidad térmica de pan blanco, por medio de un análisis de perfil de textura (ATP), determinación de humedad y microcalorimetría de barrido diferencial, respectivamente, con el fin de encontrar una relación entre los parámetros y determinar cuáles son más sensibles al envejecimiento.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES

1.1 El trigo

El trigo es por excelencia, el cereal para panificación ya que su composición (Tabla 1.1), principalmente las proteínas (10-12%), gluteninas y gliadinas, junto con los lípidos y el agua forman el llamado gluten, responsable de las propiedades de cohesividad y de viscoelasticidad de la masa de panificación (Badui, 2006).

Tabla 1.1. Composición de la harina de trigo.

73.5% de hidratos de carbono compuestos de
<ul style="list-style-type: none">• 71% almidón• 2.4% azúcar soluble• 0.1% celulosa
13% de proteína, compuesta de
<ul style="list-style-type: none">• 12% proteína formadora de gluten• 1% proteína soluble en agua
14% de agua
<ul style="list-style-type: none">• 1% grasa• 0.1% minerales

*Datos de INAES (2012).

El gluten es rico en residuos de cisteína que permite formar enlaces disulfuro intra e intermoleculares durante el amasado manual o mecánico, ya que las gluteninas y las gliadinas se desnaturalizan y forman ese tipo de enlaces y mediante interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas permiten que estos polímeros se orienten longitudinalmente; los esfuerzos mecánicos inducen un intercambio de grupos azufrados entre las múltiples cisteínas. El resultado de este proceso es la formación de una red elástica y cohesiva necesaria para el esponjamiento de la masa ocasionado por la generación de CO₂ durante la fermentación (Badui, 2006).

La panificación es casi un proceso de aireación ya que hay que controlar la fase gaseosa durante toda la fabricación, por tanto las etapas principales de la

panificación relacionadas con la aireación son: amasado, fermentación y horneado. Durante el mezclado y amasado se incorporan pequeñas burbujas de aire a la masa, las cuales se van agrandando con el dióxido de carbono que se genera durante la fermentación y finalmente, esta estructura esponjosa se modifica y se consolida durante la cocción (Dendy, 2004).

1.2 El pan

El pan desde un punto de vista reológico es una estructura esponjosa de celdillas, que contienen gas, interconectadas entre sí, a partir de las cuales se define su calidad (Dendy, 2004). Para que el pan sea de buena calidad debe alcanzar suficiente volumen, aspecto atractivo, tanto en forma como en color y una miga finamente vesiculada y suficientemente firme para que se la pueda cortar en rebanadas. Asimismo, la calidad depende de la materia prima utilizada (Kent, 1961).

La calidad del producto horneado, se debe en alguna medida a las propiedades reológicas de la masa antes de la cocción, esta masa se caracteriza por ser un material viscoelástico de comportamiento no lineal. Los cambios reológicos de la masa se deben al amasado, pues en esta etapa se producen las características mecánicas requeridas para que la masa tenga un volumen y estructura adecuados. En esto radica el interés de estudiar la estructura del pan (Dendy, 2004).

1.2.1 Funcionalidad de ingredientes

- **Harina:** Para la elaboración de pan la harina debe proceder en gran proporción de trigos fuertes y debe tener proteína en cierta cantidad y de calidad satisfactoria, fuerza y estabilidad, adecuada producción de gas, con un contenido de humedad menor o igual de 14% y buen color.

- **Agua:** El agua tiene una función nutritiva para la levadura. Además, permite que se realicen diversas acciones elásticas. El agua mejora la red de proteínas, modifica sus uniones y facilita que los estratos proteínicos se deshagan (Calaveras, 2004).
- **Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*):** La levadura se encarga del desarrollo de una parte del aroma mediante la producción de alcoholes, aromas típicos de panificación y éteres. La función más importante es la acción de subida de la masa, debido a la producción de CO₂ (anhídrido carbónico) y alcohol etílico en forma de etanol. La acción de las levaduras se concreta principalmente con una reducción de pH, debida en parte, al CO₂ producido que se disuelve en el agua de la masa (Calaveras, 2004).
- **Sal:** La sal se adiciona con el objeto de dar cierto sabor al pan, aunque también hace más correoso el gluten (Kent, 1961), debido a que favorece la absorción de agua de las proteínas (Calaveras, 2004) y como consecuencia la formación de una mayor cantidad de gluten (Quaglia, 1991). Por otra parte, el gluten formado tiene fibras cortas, como consecuencia de las fuerzas de atracción electrostáticas que ocurren en la malla formada con la sal, se presenta rígido, confiriendo a la masa mayor compactación (Quaglia, 1991).
- **Aditivos:** Los aditivos son materias primas que sin constituir en sí mismas un alimento ni poseer valor nutritivo se agregan intencionadamente a los alimentos, en cantidad mínima regulada, con el objeto de facilitar o mejorar el proceso de elaboración, conservación, características organolépticas o uso de éstos.

En masas para panificación se utilizan aditivos como: cisteína, sulfato de sodio, amilasas, ácido ascórbico, yodato de potasio, peróxido de calcio, emulsionantes, reconstituyentes, harina de soya, celulosa y sus derivados, sal e hidrocoloides. Estos últimos tienen la función de regular la distribución de agua, y la capacidad de retención de ésta en la masa, por lo tanto, mejoran el rendimiento. Además, fortalecen la estructura de la miga del pan (Simpson, 2012).

1.3 Xantana

La estructura de la miga de pan es uno de sus atributos más importantes. Existe una relación entre la estructura de la miga y la apariencia, además, la estructura de la miga tiene impacto sobre el volumen y la textura del pan (Ozge et al., 2009).

Se han encontrado diversas aplicaciones de hidrocoloides como aditivos en productos de panadería. Su efecto funcional se encuentra en su habilidad de modificar las propiedades reológicas de la masa y en mantener las cualidades de un producto recién horneado (Shittu et. al, 2009).

Las gomas o hidrocoloides son polisacáridos hidrosolubles de alto peso molecular que funcionan como mejoradores de textura, emulsionantes, reductores de grasa, agentes atrapantes, formadores de películas, estabilizantes, alargadores de vida de anaquel, entre otros (Ozge et al., 2009). Específicamente, se ha encontrado que el uso de hidrocoloides afecta la estabilidad de la masa durante el “proofing”.

Esta estabilidad mejora cuando se adicionan gomas como alginato de sodio, κ -carragenina, xantana e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) (Shittu, 2009). En estudios previos se ha comprobado que los hidrocoloides tienen la habilidad de modificar la micro-estructura, por múltiples interacciones entre los constituyentes del pan, en especial los gránulos de almidón (Ozge et al., 2009). A su vez se ha reportado que una concentración de 0.1% de diferentes hidrocoloides, es suficiente para observar cambios en las propiedades del pan, ya que todos los hidrocoloides son capaces de reducir la pérdida de agua de la miga durante el almacenamiento (Shittu et al., 2009). Se ha observado que la xantana presenta el mayor efecto sobre las propiedades viscoelásticas de la masa, principalmente haciéndola más resistente (Shittu et al., 2009), debido a la fuerte interacción entre el hidrocoloide y las proteínas. Además, aumenta la absorción de agua, mejora la habilidad de retención de gas de la masa al aumentar su volumen y aumenta la actividad de agua de la miga (Guinoza, 2008).

La xantana es un polisacárido extracelular secretado por la bacteria *Xanthomonas campestris* (Guinoza, 2008). Se produce por fermentación aeróbica, en un medio

que contiene hidratos de carbono, una fuente de nitrógeno, potasio, fosfato y otros minerales traza, inoculado con una cepa selectiva. Se incuba por tres días a 30 °C y el producto obtenido es transferido a un tanque para ser sometido a tratamiento térmico y eliminar los microorganismos viables. El polisacárido es precipitado con isopropilalcohol (IPA) y las fibras resultantes se separan por centrifugación, se secan, se muelen, se tamizan y finalmente se empaacan (Imeson, 1992).

La Figura 1.1 muestra la estructura primaria de la xantana, la cual está formada por residuos de D-glucosa, D-manosa y ácido D-glucurónico en una relación molar de 2.8:3.2; también contiene aproximadamente 4.7% de grupos acetilo y 3.5% de ácido pirúvico.

Es un polisacárido reofluidificante, soluble en agua fría o caliente, y forma disoluciones muy viscosas estables en un intervalo de pH de 1 a 9, así como muy sensible a la presencia de diversas sales en el medio; es resistente a la degradación enzimática, funciona como un buen crioprotector, es compatible con otros hidrocoloides y muestra sinergia con los galactomananos.

Legalmente es un aditivo permitido por la Food and Drug Administration (FDA) y, en Europa y en México, su aplicación debe darse bajo las “buenas prácticas de manufactura” (Badui, 2006). Se encuentra en la lista de aditivos permitidos para alimentos del CODEX Alimentarius con el código E145.

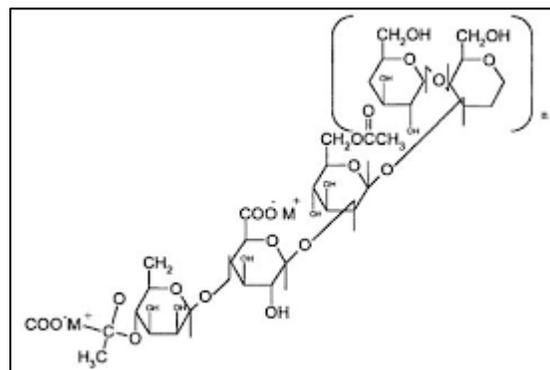


Fig. 1.1. Estructura de la xantana.

1.4 Elaboración de pan

El proceso de elaboración de pan, involucra tres etapas críticas, de las cuales depende la calidad del producto final, las cuales son: amasado, fermentación y cocción.

- a) **Amasado. Formación de la masa.** Al añadir agua a la harina se produce el efecto de homogeneización que transforma los ingredientes en un solo cuerpo llamado masa (Calaveras, 2004). La absorción de agua, se debe principalmente a los gránulos de almidón y a las proteínas presentes en la harina. Una proporción grande de gránulos dañados, da lugar a una mayor absorción (Simpson, 2012). Durante la mezcla, las moléculas proteínicas de la harina tras unirse entre sí, se estiran y se encuentran de manera que los grupos electronegativos se someten a la acción del agua. Después se forman enlaces covalentes con los residuos de cisteína para formar una masa viscoelástica (Quaglia, 1991). En la fase de amasado existen procesos óxido-reductores debido a la absorción de aire (Quaglia, 1991), además esto provoca un ligero aumento de volumen, dejando en claro que existe una pequeña fermentación desde el momento en el que se añade la levadura (Calaveras, 2004). El dióxido de carbono se difunde dentro de las burbujas de aire durante el mezclado (Birch et al., 2013).

- b) **Fermentación.** La fermentación inicia en el amasado y finaliza en el horno (Calaveras, 2004). Durante la fermentación, la levadura tiene dos funciones: favorecer la maduración de la masa y producir gas para airear la masa (Quaglia, 1991 y Calaveras, 2004). La levadura utiliza los azúcares simples para producir etanol y dióxido de carbono, como productos primarios.

- c) **Cocción.** Una vez metida la pieza de pan en el horno, el calor se propaga desde el exterior hacia el interior de la masa y las moléculas de agua se mueven desde el interior hacia el exterior de ésta de tal forma que al llegar a su

superficie se evaporan. Esto provoca un aumento de temperatura en la superficie externa que conduce a la formación de la corteza.

En esta etapa ocurren fenómenos físicos y bioquímicos en el pan. Dentro de los cambios físicos se encuentra el aumento en el volumen del pan a causa de la dilatación del gas y de la tensión del vapor de agua, debidos a la temperatura del horno, la masa sufre un rápido aumento en el volumen que alcanza el máximo desarrollo después de un tiempo (Quaglia, 1991).

Por último, también ocurren cambios bioquímicos durante la cocción. En el interior la inactivación de las células de levadura y enzimas, la formación de la estructura coloidal de la miga del pan, debida a la gelatinización y posterior cristalización del almidón. Sobre la superficie, la caramelización de los azúcares restantes y la desnaturalización de las proteínas (Calaveras, 2004 y Quaglia, 1991).

1.5 Envejecimiento del pan

Según Fessas & Schiraldi (1998), el pan es un sistema coloidal inactivo en el que ocurren muchos cambios simultáneos durante el tiempo, como el aumento de la dureza, la pérdida de humedad y retrogradación del almidón, es por esto que el envejecimiento del pan ha sido estudiado desde hace tiempo. El término “envejecimiento” hace referencia a la disminución gradual de la aceptación del consumidor de pan debido a todos los cambios químicos y físicos que tienen lugar en la corteza y en la miga durante el almacenamiento.

Los procesos que provocan el envejecimiento realmente comienzan durante el enfriamiento una vez concluido el horneado, incluso antes de que el almidón haya solidificado lo suficiente como para que la pieza de pan pueda ser cortada. El envejecimiento está asociado principalmente con el endurecimiento de la miga (Stanley, 1998). El aumento de la dureza del pan generalmente está relacionado con la pérdida de humedad, ya que el agua presente en la miga emigra hacia la

costra (Fessas & Schiraldi, 1998), sin embargo, existe un cambio químico conocido como retrogradación, el cual ocurre después de que el pan es horneado.

El almidón se gelatiniza, y cuando el proceso de envejecimiento empieza, esta gelatinización se revierte y las moléculas de almidón se cristalizan haciendo que se pierdan moléculas de agua, lo que ocasiona que la miga se endurezca (Simpson, 2012).

El almidón es el principal componente de la harina y juega un papel importante en la formación de la estructura, las propiedades físicas y el mantenimiento de la calidad del pan (Stanley, 1998). Durante el almacenamiento el pan presenta una serie de cambios en su estructura, los cuales se conocen como envejecimiento del pan, en el que la amilosa se asocia rápidamente en el pan poco después del horneado, afectando la firmeza inicial, pero no juega más papel en el endurecimiento de la miga. Este endurecimiento se ha atribuido a cambios en la orientación física de las moléculas ramificadas de amilopectina del almidón, que se encuentran dentro del gránulo hinchado. En el pan las cadenas ramificadas de amilopectina están desplegadas y se extienden dentro de los límites del agua disponible. Estas cadenas de polímero se agregan gradualmente alineándose unas con otras mediante varios tipos de enlaces intramoleculares. Este efecto produce una rigidez mayor de la estructura interna de los gránulos de almidón hinchados causando el endurecimiento de la miga (Stanley, 1998). La retrogradación es un tema de importancia en panadería ya que sucede durante el almacenamiento, y es otra de las causas del endurecimiento del pan (Birch et al., 2013).

1.5.1 Pérdida de humedad

Durante el almacenamiento, ocurren migraciones de agua en el pan que dan lugar a cambios en las características del producto (Luna-Fernández, 2011). La humedad migra a través de la miga hacia la costra, y provoca que ésta se vuelva más seca y correosa, por el contrario, la costra se vuelve menos crujiente (Fessas & Schiraldi, 1998).

1.6 Análisis de Perfil de Textura (APT)

La textura se define como todos los atributos mecánicos, geométricos y superficiales de un producto perceptibles por medio de receptores mecánicos, táctiles y, si es apropiado, visuales y auditivos (Rosenthal, 2001). Las técnicas instrumentales utilizadas para medir la textura de los alimentos se clasifican en tres grupos:

1. Ensayos empíricos
2. Ensayos imitativos
3. Ensayos fundamentales

El APT es un ensayo imitativo que se realiza con un instrumento llamado texturómetro, el cual trata de imitar la masticación. La máquina está equipada para proporcionar medidas de esfuerzo o deformación durante la secuencia del ensayo (Rosenthal, 2001). Este análisis consiste en colocar la muestra entre dos placas, una base fija y otra por lo general un cilindro móvil con una fuerza específica, la cual comprime la muestra dos veces imitando una mordida (Bourne, 1978). De esta prueba se obtiene una curva fuerza-tiempo (Fig. 1.2), de la cual se obtienen siete parámetros:

- **Fracturabilidad o fragilidad:** Es la fuerza (N) con la que el material se fractura.
- **Dureza:** Es el pico máximo de la curva, y se define como la fuerza (N) requerida para comprimir un alimento entre los molares.

- **Cohesividad:** Es el índice de recuperación de longitud entre la primera y la segunda compresión. Se define como el cociente entre el área del primer ciclo entre el área del segundo ciclo, por tanto, es un parámetro adimensional. Es la fuerza que los enlaces internos hacen sobre el alimento.
- **Adhesividad:** Está representada como el área negativa de la primera mordida. Se refiere al trabajo ($N \cdot m = J$) necesario para retirar el alimento de la superficie.
- **Elasticidad:** Se refiere a la altura, expresada en metros, que el alimento recupera entre un ciclo de compresión y otro, es decir, entre el final de la primera mordida y el inicio de la segunda.
- **Gomosidad:** Es el producto de la dureza por la cohesividad. Se define como la fuerza requerida (N) para desintegrar un alimento semisólido de modo que esté listo para ser tragado.
- **Masticabilidad:** Es el producto de la gomosidad por la elasticidad, lo mismo que dureza por cohesividad por elasticidad. Se define como la energía ($N \cdot m = J$) requerida para masticar un alimento sólido hasta que está listo para ser tragado.

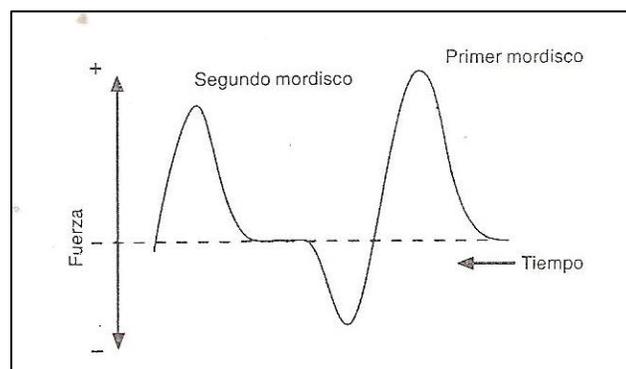


Fig. 1.2. Aspectos de un análisis de perfil de textura (Rosenthal, 2001).

1.7 Microcalorimetría de barrido diferencial

La microcalorimetría de barrido diferencial (μ DSC) es un método útil para estudiar los procesos inducidos por cambio de temperatura como cambios de fase, transformaciones alotrópicas, desnaturalización de proteínas, gelatinización de almidones, estabilidad térmica de medicamentos, curado de resinas, estudio de procesos de calentamiento y congelación de alimentos, entre muchos otros. Específicamente, una muestra de almidón sometida a calentamiento en presencia de agua, gelatiniza y este fenómeno viene acompañado de un efecto endotérmico. La μ DSC permite determinar cambios en la entalpía y en el calor específico que acompañan a las transiciones de conformación de procesos alimentarios durante las operaciones de procesado (Romani, 2006).

De esta prueba se obtiene un termograma, el cual es una representación gráfica de la transición del almidón, en el cual se obtienen tres puntos que la representan. La temperatura pico (T_p) o temperatura de gelatinización es donde se pierde la estructura cristalina de los gránulos de almidón, por lo tanto una temperatura más alta indica un arreglo cristalino más estable. El intervalo de temperatura de la transición, es decir, la diferencia entre la temperatura final (T_f) y la temperatura de inicio (T_o) el cual es un indicador del nivel de heterogeneidad de los cristales, al ser mayor el intervalo, hay una mayor heterogeneidad de los cristales (Montoya, 2010).

HIPÓTESIS

- La temperatura de fermentación afecta la humedad del pan y la estructura de la miga; a mayor temperatura, mayor tamaño de las celdas de gas.
- La concentración de xantana retarda el envejecimiento del pan, ya que disminuye su actividad del agua.
- La dureza del pan se debe a la retrogradación del almidón.

OBJETIVOS

General

- Determinar el cambio en las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de pan blanco durante su almacenamiento para conocer cuáles de ellas son más sensibles al envejecimiento de este alimento.

Particulares

- Conocer la influencia de la temperatura de fermentación sobre la estructura del pan blanco, mediante el examen de sus propiedades mecánicas, dureza, y la estructura de la miga presente, para determinar las mejores condiciones de elaboración de pan blanco utilizadas en este trabajo.
- Conocer el cambio en la estructura de la miga del pan a lo largo del tiempo, por medio de propiedades mecánicas, para determinar la escala de tiempo sobre la cual ocurren cambios atribuibles al envejecimiento.
- Conocer, durante el almacenamiento, el efecto de la adición de un polisacárido, xantana, por medio de la evaluación de las propiedades físicas y estabilidad térmica del pan, para retardar el envejecimiento.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Los ingredientes utilizados en la elaboración de pan fueron harina blanca de trigo para pan (La Espiga, Harinera La Espiga S.A. de C.V., México), sal yodada (La Fina, Sales del Istmo, S. A. de C. V., México), levadura instantánea (saf-instant, Lesaffre, Marcq-en Baroeul, France), agua y xantana grado alimenticio (Keltrol T, CPKelco, San Diego, CA, USA). En el Anexo 1 se muestra información técnica sobre el Keltrol T.

La Tabla 2.1 muestra la composición de la harina según el fabricante. La Figura 2.1 muestra el diagrama de preparación de pan. Los materiales usados para la elaboración y almacenamiento del pan fueron: aceite de olivo en aerosol (PAM, Conagra Foods México S. A. de C.V.), plástico adherente (Chinet, México) y bolsas de plástico con cierre hermético (Ziploc, México).

2.2 Elaboración de pan

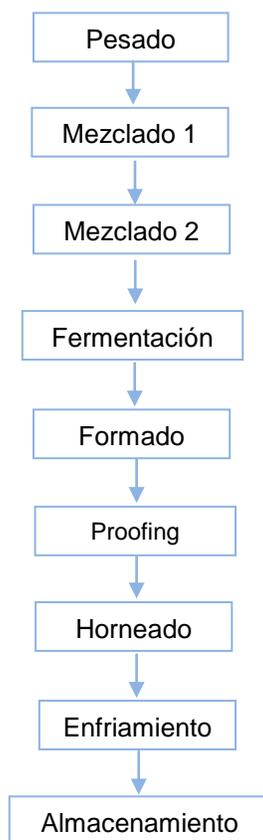


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de pan blanco.

Tabla 2.1 Composición de la harina de trigo según el fabricante.

Componente	Contenido (g/100 g)
Proteína	10.5
Grasa	1.6*
Hidratos de carbono	70.83**
Fibra dietaria	1.5
Sodio	0.003
Vitamina B1	0.0005
Vitamina B2	0.0003
Vitamina B3	0.0035
Ácido fólico	0.0002
Hierro	0.004
Zinc	0.004

*de los cuales 0.9 g son grasa saturada; **de los cuales 8 g son azúcar

Pesado de ingredientes. Se pesaron los ingredientes tomando en cuenta las formulaciones mostradas en las Tablas 2.2, 2.3 y 2.4.

Tabla 2.2. *Formulación del pan blanco (Forkish, 2012).*

Ingredientes	Cantidad (%)	Masa (g)
Harina	57.31	750
Agua	41.26	540
Sal	1.20	15
Levadura	0.23	3

Tabla 2.3. *Formulación del pan blanco con 0.1% de xantana.*

Ingredientes	Cantidad (%)	Masa (g)
Harina	57.21	748
Agua	41.26	540
Sal	1.20	15
Levadura	0.23	3
Xantana	0.10	2

Tabla 2.4. *Formulación del pan blanco con 0.50% de xantana.*

Ingredientes	Cantidad (%)	Masa (g)
Harina	56.81	743
Agua	41.26	540
Sal	1.20	15
Levadura	0.23	3
Xantana	0.50	7

Las condiciones de preparación del pan se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Condiciones preparación del pan.

Experimento	Condiciones			
	Lote1 / Lote 2	T de fermentación (°C)	t de fermentación (h)	Xantana (%)
1		40	3	0
2		30	3	0
3		40	3	0.1
4		40	3	0.5
5		30	3	0.1
6		30	3	0.5

Mezclado de ingredientes 1. La xantana se mezcló en seco con la harina, cuando así se requirió, se mezclaron con agua a una temperatura aproximada de 50 °C en un recipiente de vidrio hasta formar una mezcla homogénea, según se ilustra en la Figura 2.2. El mezclado fue manual. El recipiente con la mezcla se tapó con plástico adherente y se dejó reposar durante 20 minutos a temperatura ambiente (Fig. 2.3).



Figura 2.2 Incorporación de harina y agua.



Fig. 2.3. Reposo de la masa.

Mezclado de ingredientes 2. Se retiró el plástico, se agregó la levadura en el centro de la masa y se espolvoreó la sal en el resto de ésta (Fig. 2.4).



Fig. 2.4. Adición de los ingredientes.

Se mezcló de forma manual durante seis minutos con el método de pinzas, el cual consiste en doblar la masa hacia el centro cubriendo la levadura y la sal (Fig. 2.5). Con los dedos índice y pulgar se formó una pinza y se cortó la masa tres a cuatro veces (Fig. 2.6), nuevamente se dobló la masa, desde el fondo del recipiente hacia arriba de forma envolvente y se repitió alrededor de cinco veces humedeciendo la mano entre cada repetición.

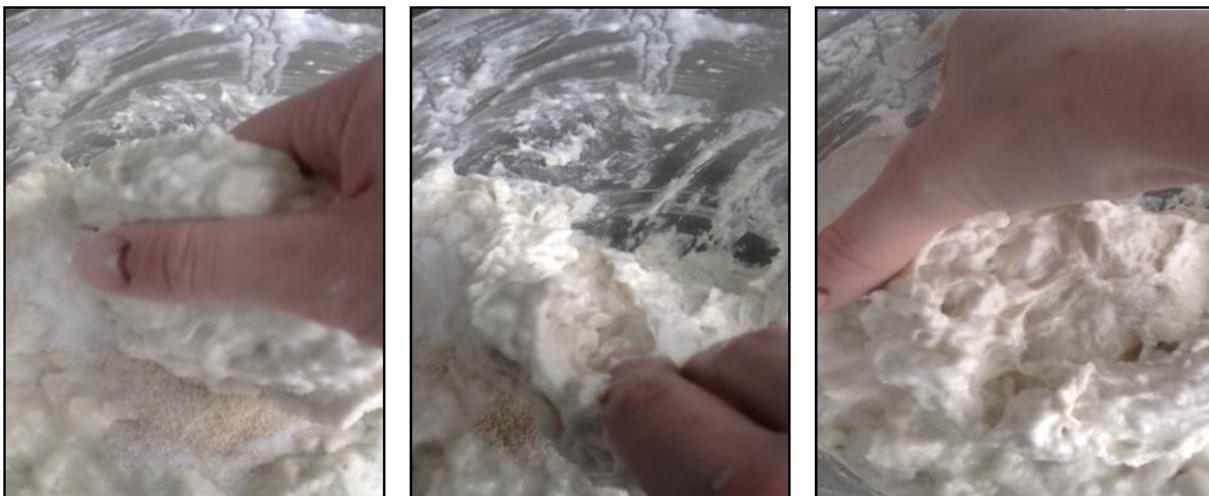


Fig. 2.5. Incorporación de la levadura y la sal.



Fig. 2.6. Método de pinzas.

Fermentación. Nuevamente se tapó con plástico el recipiente con la masa (Fig. 2.7) y se metió en una incubadora (Boekel Scientific 132 000, Pennsylvania, EUA) para fermentar la masa a 30 o 40 °C; con una humedad relativa, determinada con un higrómetro que se introdujo durante la fermentación, de 53 y 37%, respectivamente, según el experimento durante tres horas (Fig. 2.7).



Fig. 2.7. Masa cubierta con plástico adherente, lista para iniciar la fermentación

Durante la fermentación, se hicieron tres “dobles” a la masa como lo muestra la Fig. 2.8, a 10, 70 y 100 minutos.



Fig. 2.8. Dobles de la masa durante la fermentación

Formación de hogazas. Después de la fermentación (Fig. 2.9), la masa se sacó del recipiente y se colocó sobre una charola con harina (Fig. 2.10) y se dividió en diez partes aproximadamente del mismo tamaño (Fig. 2.11). De cada parte se formó una hogaza, se tomó un lado de la masa, de la base, se estiró y se dobló hacia arriba, y se hizo lo mismo con el resto de las partes hasta formar una “bola”.

Se repitió con cada parte de la masa hasta obtener diez hogazas, las cuales se colocaron sobre una charola de aluminio previamente engrasada con aceite de olivo en aerosol, para evitar que las hogazas se pegaran, cinco hogazas en una charola y cinco hogazas en otra.



Fig. 2.9. Masa después de tres horas de fermentación.



Fig. 2.10. Masa lista para ser dividida



Fig. 2.11. Corte de la masa en 10 partes

Proofing o fermentación de las hogazas. Las charolas se guardaron en bolsas de plástico y se dejaron reposar durante 1 hora a temperatura ambiente. Al mismo tiempo el horno se precalentó a 200 °C durante 45 minutos.

Horneado. Las charolas se sacaron de las bolsas de plástico y se hornearon a 200 °C en un horno eléctrico de convección (EKA KF620, Camposapiero, Italia) durante 40 minutos (Fig. 2.12).



Fig. 2.12. Hogazas en etapa de cocción.

Enfriamiento. Las hogazas se dejaron enfriar a temperatura ambiente (Fig. 2.13) por aproximadamente una hora.



Fig. 2.13. Pan recién salido del horno. Etapa de enfriamiento.

Almacenamiento. Los panes se guardaron en bolsas de plástico con cierre hermético y se almacenaron en un refrigerador. La temperatura y la humedad relativa medidas en su interior fueron 8 - 8.5 °C y 26%, respectivamente.

2.3 Humedad

Después de realizar la prueba de APT, las muestras se molieron en una licuadora doméstica (Oster, México). Se pesaron aproximadamente 5 gramos de miga molida en cajas de aluminio previamente llevadas a peso constante, por cuadruplicado.

Las muestras se secaron en un horno (HCF45 serie 91095, México), a 130 °C durante tres horas hasta obtener peso constante (NMX-F-159-S-1983). La humedad se determinó por diferencia de masa y se reportó la media y la desviación estándar.

Determinación del contenido de humedad

$$\text{Humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100$$

Donde: m_1 = masa de la caja con muestra (g)

m_2 = masa de la caja con muestra seca (g)

m_3 = masa de la muestra (g)

Determinación de la pérdida de humedad

$$\text{Pérdida de Humedad} = \left(1 - \frac{H_f}{H_0}\right) \times 100$$

Donde: H_0 = Humedad inicial (%)

H_f = Humedad final (%)

2.4 Análisis del Perfil de Textura (APT)

Para el APT, se utilizaron dos panes, se cortaron muestras de miga del centro de cada pan, para obtener alrededor de cuatro muestras por pan (Fig. 2.14), y se tuvieron ocho réplicas en total. Estas porciones se cortaron en cubos de 2.5 cm de lado, y se guardaron en una bolsa de plástico con cierre hermético para evitar la deshidratación de su superficie. Cada espécimen se analizó en un equipo de pruebas mecánicas (Sintech 1/S, MTS, EE.UU.), provisto de una celda de carga de 100 N nominal y un límite máximo de carga de 75 N, y se comprimió con un cilindro de aluminio de 25 mm de diámetro. Se hicieron dos ciclos consecutivos de compresión a una velocidad de 60 mm/min y una deformación de 50% en relación con la dimensión inicial del espécimen. Solo se hizo el APT de la miga.

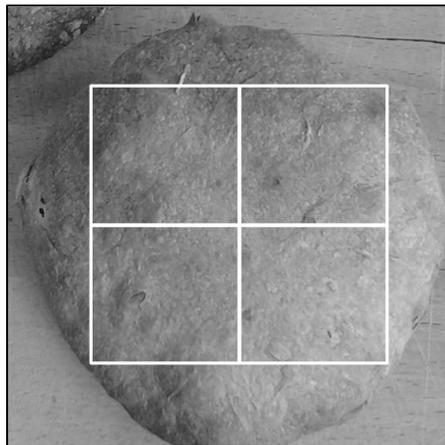


Fig. 2.14. Representación de los cortes en el pan para obtener los cubos en los que se hizo el APT.

2.5 Microcalorimetría de barrido diferencial

Se usó un microcalorímetro (μ DSC7 evo, Setaram, Caluire, Francia). Para esta prueba la miga se mezcló con agua en una proporción 1:2. Se pesaron 750.0-780.0 mg de muestra en celdas Hastelloy y se utilizó agua desionizada como referencia.

Se programó una prueba de calentamiento-enfriamiento y se determinó la entalpía de gelatinización o retrogradación de almidón, por integración del área bajo la curva haciendo referencia a la primera derivada de la línea base del termograma

(Fig. 2.15), para fijar T_o (a) y T_f (b), las cuales marcan el inicio y el fin de la transición de gelatinización del almidón, respectivamente. Se tomó T_p (c) como temperatura de la transición, i.e. gelatinización o retrogradación, según el caso.

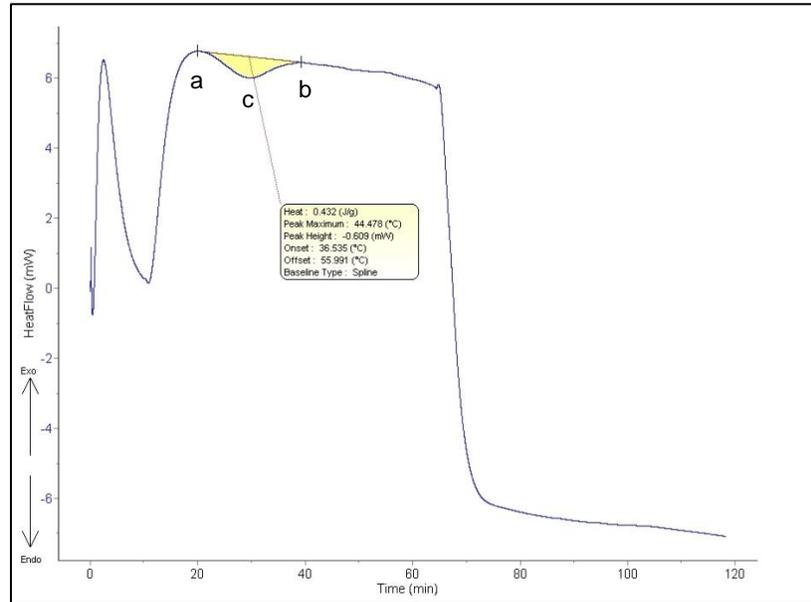


Fig.2.15. Termograma de una muestra de miga correspondiente al Experimento 2, Lote 1, día 1.

Determinación de la cristalinidad del almidón

El grado de cristalinidad del almidón durante el almacenamiento se calculó con la siguiente relación (Primo-Martin, et al., 2007).

$$\frac{\Delta H_m}{\Delta H_h} \times 100$$

Donde: ΔH_m = Entalpía de transición térmica de la muestra (J/s)

ΔH_h = Entalpía de transición térmica de la harina (J/s)

2.6 Análisis estadístico

En este estudio se varió la temperatura de fermentación y la sustitución de harina por xantana en dos niveles 30 y 40 °C; 0.1 y 0.5%, respectivamente, teniendo como resultado una combinación de seis experimentos, que se realizaron por duplicado. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con

interacción para encontrar el efecto de las variables sobre los experimentos. Se realizó un estudio de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para detectar diferencia significativa entre las diferentes concentraciones de xantana y la temperatura de fermentación.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pérdida de Humedad

El contenido de humedad inicial de la miga de pan en los diferentes experimentos (Tabla 2.4) se encontró en el intervalo de 42.53 a 44.77% (Tabla 3.1).

La adición de cualquier hidrocoloide, provoca un aumento en el contenido de humedad inicial de pan fresco (Guarda et al., 2004). Sin embargo, la Tabla 3.1 muestra que bajo las condiciones usadas en este trabajo, la adición de 0.1 y 0.5% de xantana (experimentos 3, 5 y 4, 6, respectivamente) no aumentó el contenido inicial de humedad ya que no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los contenidos de humedad iniciales de los diferentes experimentos con y sin adición de xantana. A pesar de ello el contenido de humedad de la miga disminuyó a lo largo del almacenamiento, lo cual concuerda con lo observado por Besbes et al. (2014) quienes estudiaron el efecto de las condiciones de horneado (180 °C/34 min y (220 °C/28.6 min) y almacenamiento con costra, de pan blanco de caja; y por Curti et al. (2014) quienes probaron el efecto de la adición de gluten de trigo *vital* (10% humedad, 81% b.s. gluten, 1% b.s. cenizas) en 5 y 15% sobre las propiedades fisicoquímicas; volumen y estructura de la miga, APT, contenido de humedad, contenido de agua congelada y retrogradación de amilopectina así como la movilidad molecular de protones por medio de resonancia magnética nuclear en pan preparado a base de harina blanca de trigo.

Tabla 3.1. Contenido de Humedad (%) de la miga de pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	H_i (%)	H_f (%)	Pérdida total de humedad (%)
1	42.53 ± 1.239 ^a	30.72 ± 0.255 ^a	27.77
2	43.43 ± 0.728 ^a	32.57 ± 0.180 ^a	25.00
3	44.76 ± 0.615 ^a	33.63 ± 0.0269 ^a	24.85
4	43.53 ± 0.267 ^a	34.02 ± 3.09 ^a	21.85
5	44.75 ± 0.913 ^a	34.02 ± 3.09 ^a	23.98
6	44.77 ± 0.704 ^a	36.66 ± 2.32 ^a	18.11

abc: Diferente letra en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

Por otro lado, la adición de xantana no tuvo efecto sobre el contenido de humedad al inicio y al final del almacenamiento, lo cual no concuerda con lo reportado por Mohammadi et al. (2014) quienes observaron que la adición de 0.5% de xantana o de CMC aumenta la humedad de pan libre de gluten preparado a base de harina de almidón de maíz, harina de arroz, harina de soya y almidón de maíz pre-gelatinizado, fermentado a 35 °C durante 40 minutos y horneado a 260 °C por 14 minutos.

El contenido de humedad de la miga de pan blanco depende de factores como el tipo de harina, ingredientes y variables de proceso como la temperatura de fermentación, la humedad relativa de fermentación y la temperatura y tiempo de cocción (Shittu et al, 2009).

La pérdida total de humedad durante el periodo de almacenamiento (Tabla 3.1), fue menor a medida que aumentó la concentración de xantana, lo cual se atribuye a su capacidad de interaccionar con el agua. Esto coincide con investigaciones anteriores (Shittu et al., 2009) en las cuales se encontró que la adición de 1.0% de xantana es suficiente para evitar la pérdida de humedad. Del mismo modo Mohammadi et al. (2014) encontraron que la pérdida parcial de humedad de pan libre de gluten disminuye al aumentar la concentración de los hidrocoloides; 0.5, 1.0 y 1.5%. En contraste, Guarda et al. (2003) demuestran que la adición de hidrocoloides como HPMC, xantana y alginato (0.1 y 0.5%), reducen la

deshidratación de la miga durante el almacenamiento ya que la humedad fue mayor para aquellos panes adicionados con 0.5% de hidrocoloide y no se encontraron diferencias entre los hidrocoloides probados.

Por otra parte, la temperatura de fermentación no tuvo efecto alguno sobre el contenido de humedad inicial y final del pan (Tabla 3.1). Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran una tendencia decreciente de la humedad durante el almacenamiento, es decir, a lo largo de diez días, el pan sufrió una pérdida de agua. La pérdida de humedad sigue una tendencia lineal decreciente, lo cual corresponde a un modelo cinético de orden cero compuesto por dos zonas: de 0 a 6 días y de 6 a 10 días (Tabla 3.2) en la cual se observa que la primera zona tiene una pendiente mayor que la segunda zona, lo que significa que durante los primeros días de almacenamiento la pérdida de humedad del pan fue mayor, y a medida que transcurrió su envejecimiento, esta pérdida fue menor, casi hasta volverse constante con excepción del pan fermentado a 40 °C con 0.5% de xantana (Fig. 3.2 (c)) en el cual la pérdida de humedad fue lenta durante los primeros días de almacenamiento y en los últimos días fue más rápida.

Tabla 3.2. Parámetros de regresión lineal (2 zonas) que describen el comportamiento de la pérdida de humedad del pan.

Xantana (%)	30 °C			40 °C		
	Zona	k*	r ²	Zona	k*	r ²
0	0 a 6 días	1.47	0.9950	0 a 6 días	1.88	0.9998
	6 a 10 días	0.48	0.6994	6 a 10 días	0.43	0.4962
0.1	0 a 6 días	1.83	0.9933	0 a 6 días	1.31	0.9687
	6 a 10 días	0.59	0.9517	6 a 10 días	0.75	0.6984
0.5	0 a 6 días	0.94	0.9766	0 a 6 días	0.50	0.6955
	6 a 10 días	0.72	0.9295	6 a 10 días	1.22	0.9872

*k = dH/dt (%/días)

La Figura 3.3 muestra la velocidad de disminución relativa de humedad. En la muestra control, sin xantana, y en la muestra con 0.1% de xantana la humedad disminuyó más rápido que en la muestra con 0.5% de xantana, lo cual permite

afirmar que un aumento en la concentración de xantana retarda el envejecimiento del pan. Esto es atribuible a la gran afinidad de este polisacárido por el agua lo cual aumenta la retención de humedad en la miga. Además, a medida que la concentración de hidrocoloide aumentó, la velocidad de disminución de humedad fue menor.

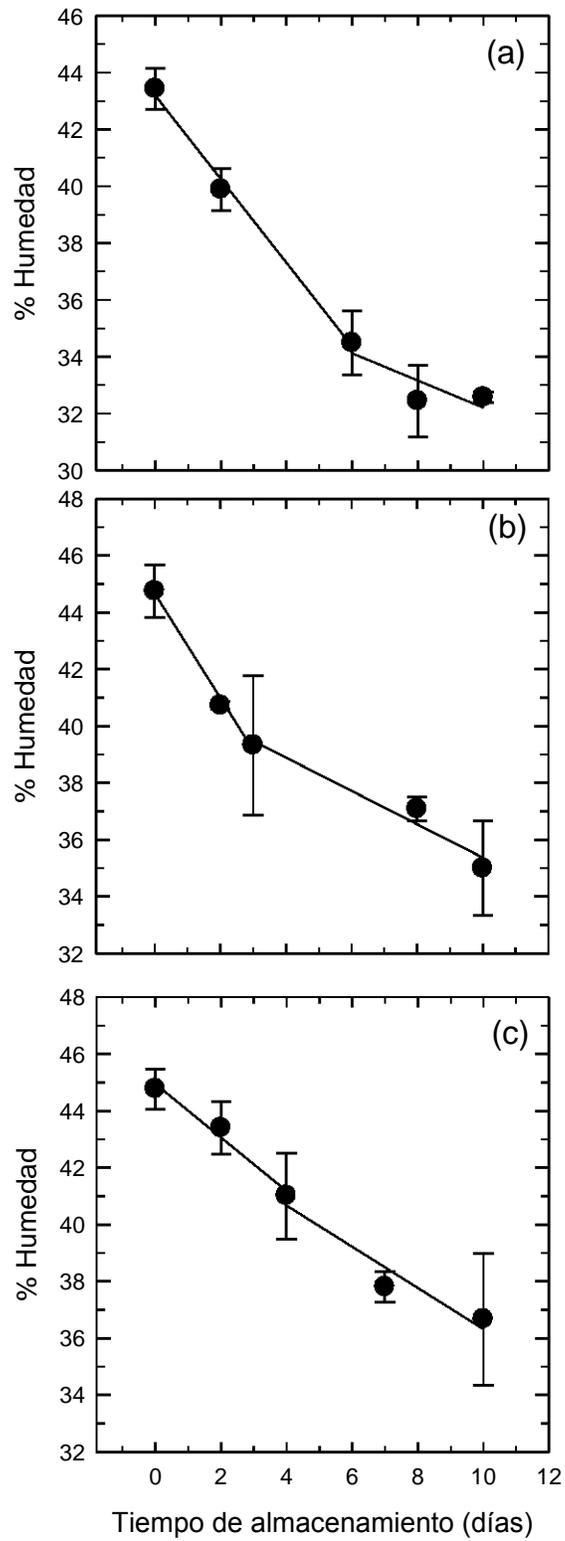


Fig. 3.1. Variación del contenido de humedad con el tiempo de almacenamiento de pan fermentado a 30 °C (a) control, (b) 0.1% Xantana y (c) 0.5% xantana.

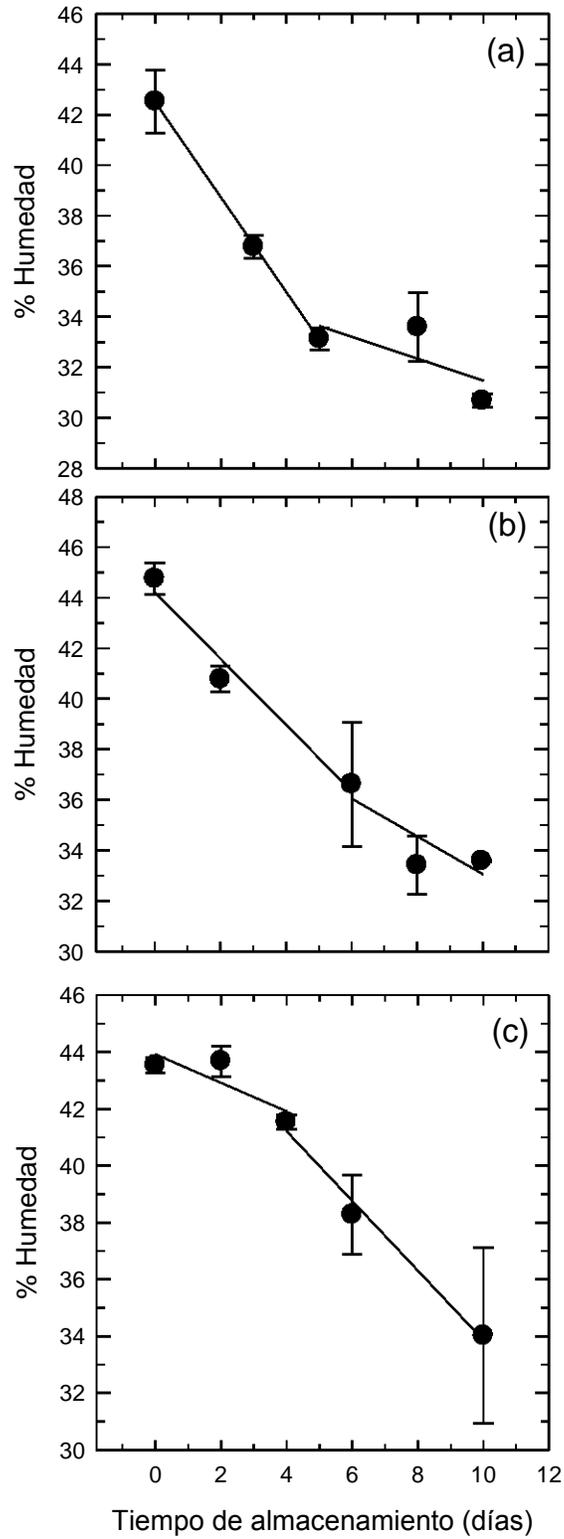


Fig. 3.2. Variación del contenido de humedad con el tiempo de almacenamiento de pan fermentado a 40 °C (a) control, (b) 0.1% Xantana y (c) 0.5% xantana.

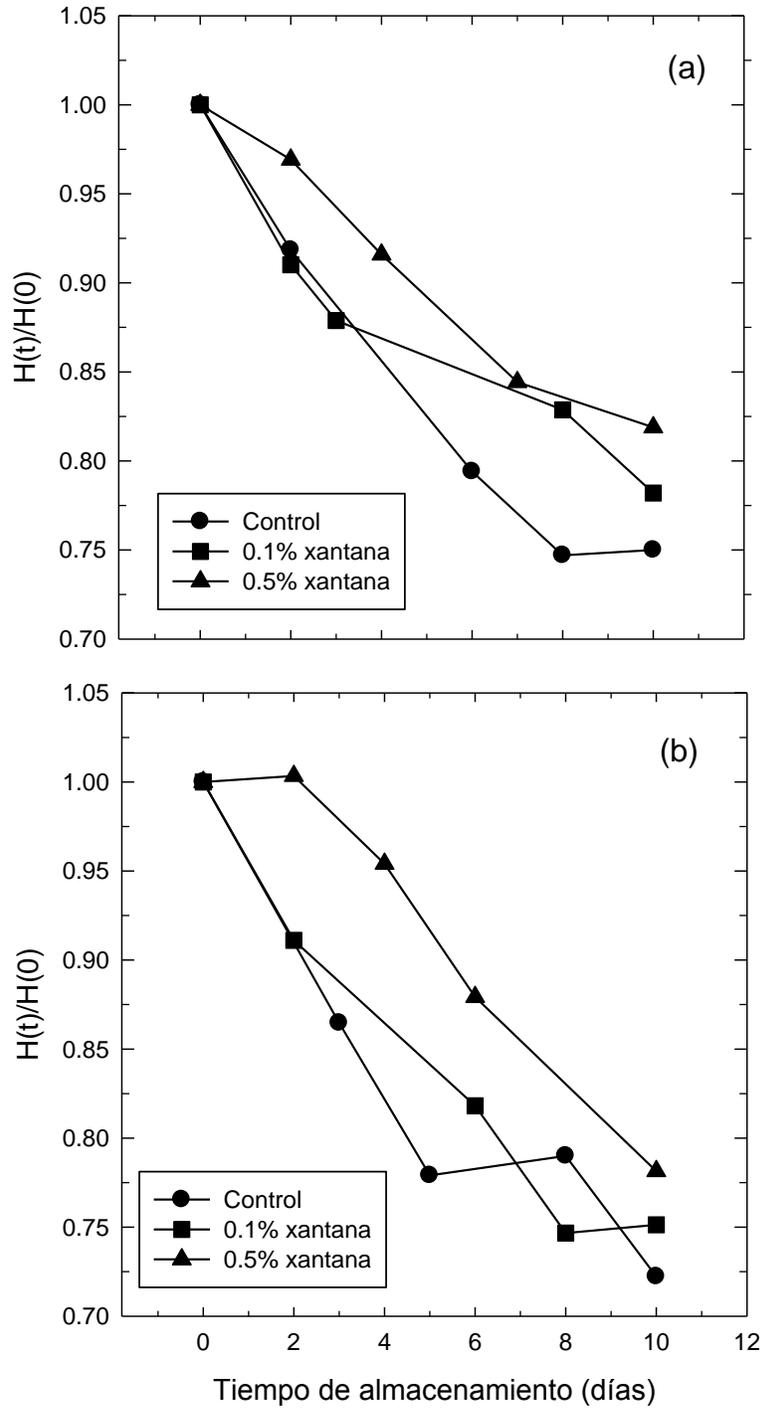


Fig. 3.3. Pérdida relativa de humedad del pan fermentado a 30 °C (a) y 40 °C (b).

3.2 Análisis de Perfil de Textura

3.2.1 Dureza

La dureza expresa la fuerza máxima necesaria para deformar un alimento y es entonces una medida de su resistencia a la ruptura por compresión. En las Figs. 3.4 y 3.5 se observa el aumento de dureza durante el almacenamiento, lo cual concuerda con lo reportado por Stölman & Lundgren (1987), quienes estudiaron los cambios en la textura de pan blanco al variar la temperatura final de la masa (22, 26, 30 y 33 °C), el tiempo y temperatura de fermentación (45 °C/45 min, 30 °C/30 min, 30°C min/25 min y 35°C /20 min) y tiempo y temperatura de “proofing” (33 °C/50 min, 38 °C/40 min, 40°C/35 min y 45°C/25 min), a través de la comparación entre resultados de evaluación sensorial y pruebas instrumentales. Ellos encontraron que la suavidad del pan blanco disminuye conforme aumenta el tiempo de almacenamiento. Del mismo modo, concuerda con lo estudiado por Besbes et al. (2014) quienes atribuyen el aumento de la dureza a la retrogradación de amilopectina en la miga de pan blanco de caja, y afirman que la amilopectina está relacionada con las condiciones de horneado, es decir, a mayor temperatura de cocción, mayor retrogradación de almidón. Sin embargo, el aumento de la dureza también se atribuye en parte a la pérdida de agua y a su transferencia a través de la miga hacia la costra.

La Tabla 3.3 muestra que no se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$) en la dureza inicial y final de las muestras. Esto puede deberse posiblemente a la falta de repetibilidad de los resultados entre las muestras de un mismo experimento, ya que como lo explican Scanlon & Zghal (2001), la dureza depende de la región del pan de donde se tome la muestra; por lo general, se utilizan muestras del centro del pan blanco preparado a base de harina de trigo. Este resultado se contrapone con la investigación de Mohammadi et al. (2014) quienes encontraron que la adición de xantana y de CMC disminuyen la dureza del pan plano libre de gluten hecho a base de harina de almidón de maíz, harina de arroz, harina de soya, tanto en el tiempo inicial como final del almacenamiento, debido a que los hidrocoloides

debilitan la estructura del almidón, redistribuyendo el agua y manteniéndola en la miga, generando una disminución de la dureza. Además, encontraron que a mayor concentración de xantana (1.5%), menor dureza. Del mismo modo Sciarini et al. (2012) probaron diferentes aditivos, entre ellos los hidrocoloides como xantana, CMC, alginato y κ -carragenina al 0.5% en pan libre de gluten a base de harina de arroz y soya, almidón de yuca. Ellos demostraron que la dureza inicial disminuye. Esto mismo fue reportado por Demirkesen et al. (2014) quienes encontraron que la adición de hidrocoloides como metilcelulosa, agar, algarrobo, guar, xantana, CMC, y HPMC al 0.5% en pan libre de gluten hecho a base de harina de arroz, disminuye la dureza inicial del pan.

Tabla 3.3. Dureza de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	Dureza inicial (N)	Dureza final (N)
1	6.92 ± 1.92 ^a	48.64 ± 2.95 ^a
2	10.18 ± 4.40 ^a	33.72 ± 673 ^b
3	5.11 ± 1.93 ^a	42.15 ± 6.51 ^a
4	6.11 ± 0.07 ^a	38.63 ± 5.21 ^a
5	3.67 ± 0.26 ^a	24.50 ± 4.45 ^b
6	5.69 ± 1.26 ^a	25.03 ± 14.17 ^b

abc: diferente letra en la columna, indica diferencia significativa $p < 0.05$.

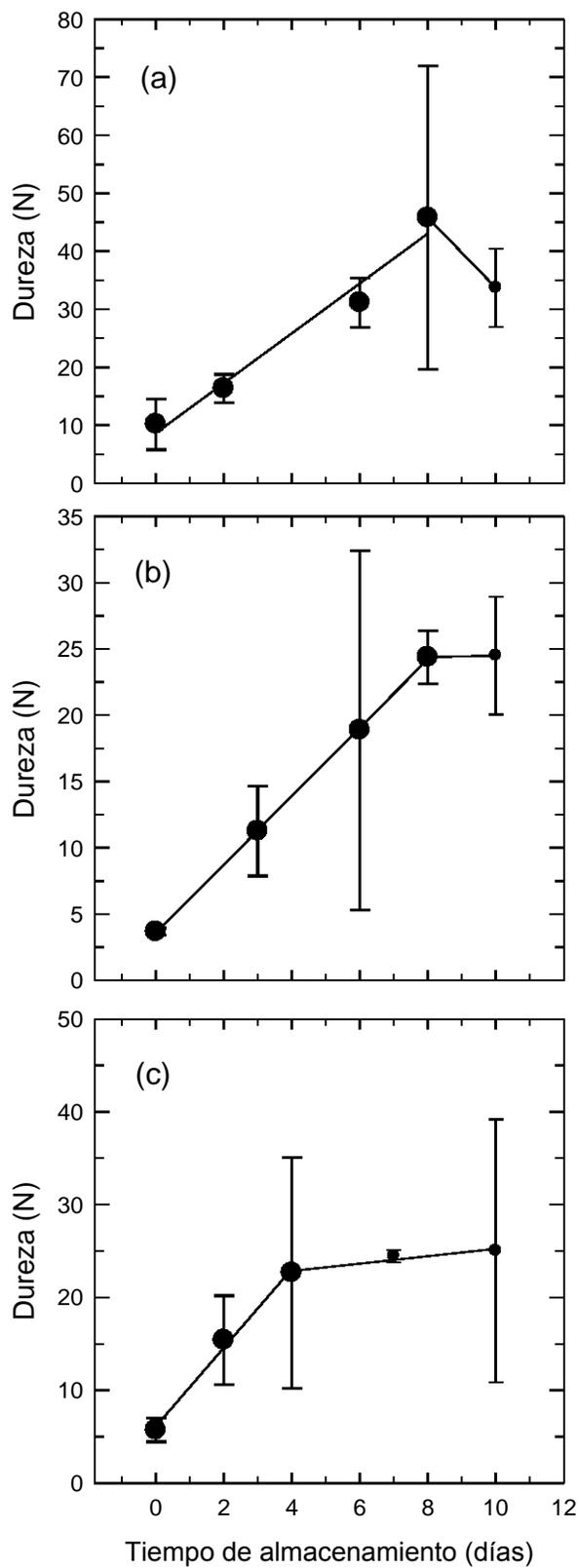


Fig. 3.4. Aumento de la dureza durante el almacenamiento de pan fermentado a 30 °C (a) control, (b) 0.1% Xantana y (c) 0.5% xantana.

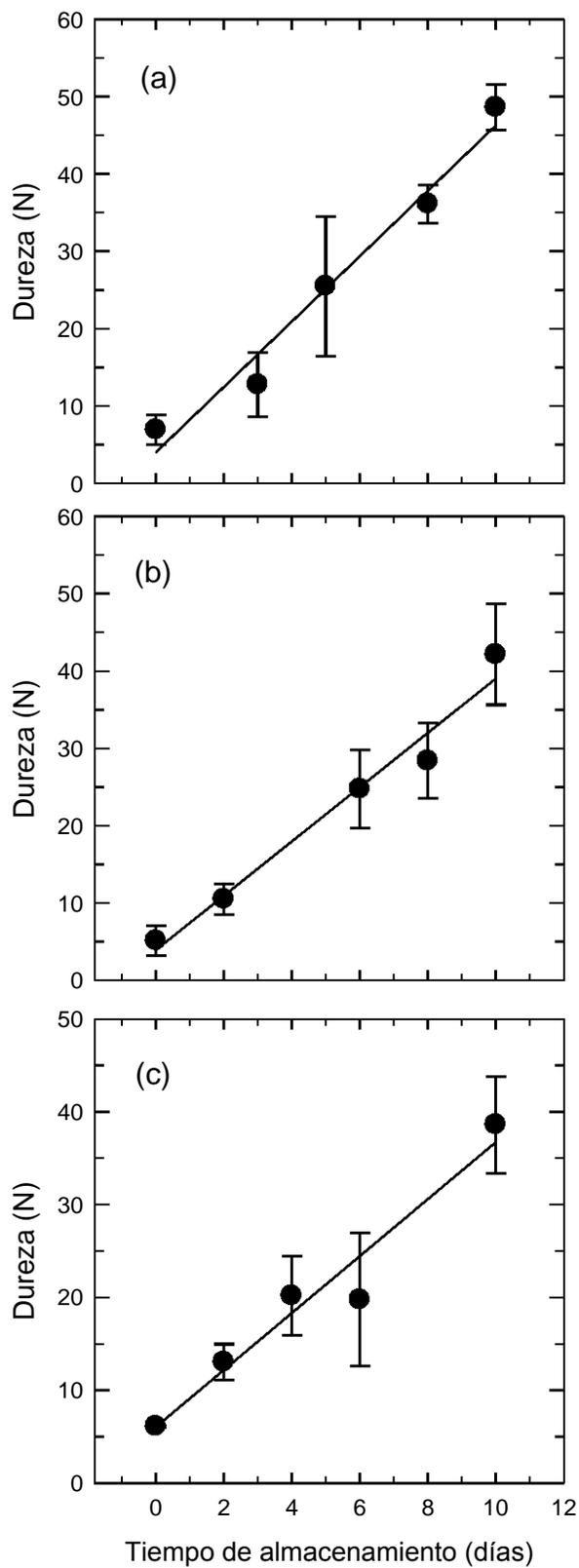


Fig. 3.5. Aumento de la dureza durante el almacenamiento de pan fermentado a 40 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

Por otra parte, en el último día de almacenamiento solo se encontró que la temperatura de fermentación tuvo efecto sobre la dureza de las muestras (Tabla 3.3). A mayor temperatura, mayor dureza debido quizá a la estructura de la miga, es decir, al tamaño de las celdas de gas que se formaron durante la fermentación; a mayor temperatura, mayor rapidez de producción de CO_2 y por lo tanto el gas que se está formando no se distribuye con la misma rapidez dentro de la masa y en consecuencia hay coalescencia formando celdas más grandes.

Durante el horneado, el gas que formaron esas celdas, daría como resultado un pan menos denso con mayor volumen y eso provocaría que durante la compresión de la miga se libere rápidamente el aire de la muestra, dando como resultado mayor dureza de la miga. Este fenómeno se observa en la Figura 3.6, en la cual se aprecia que la muestra de masa fermentada a $40\text{ }^\circ\text{C}$ al ser comprimida presenta una fuerza de deformación que aumenta rápidamente alcanzando un valor de dureza más grande respecto a la muestra de masa fermentada a $30\text{ }^\circ\text{C}$, en la cual se observa que el cambio de deformación es gradual, es decir, la fuerza de deformación crece más lentamente.

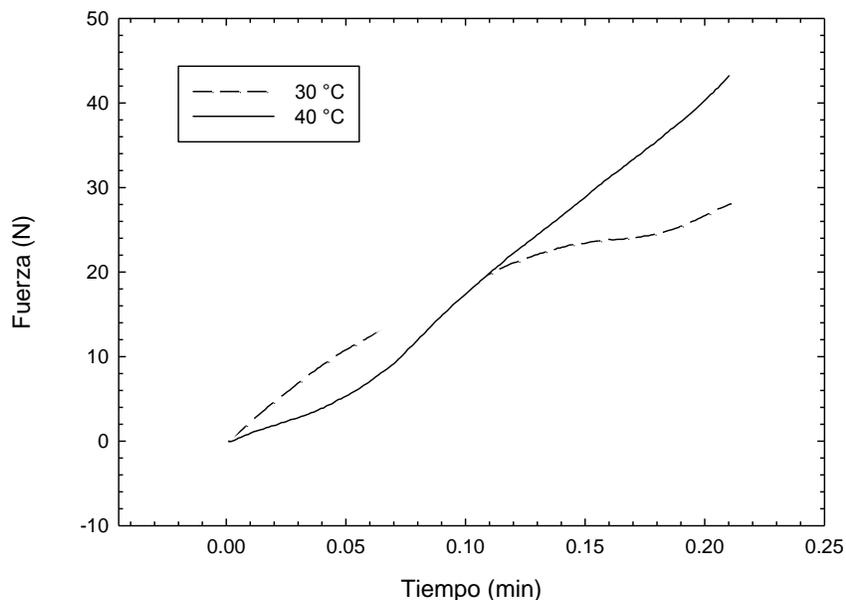


Fig. 3.6. Curva de compresión de una muestra de miga de masa fermentada a $30\text{ }^\circ\text{C}$ y otra fermentada a $40\text{ }^\circ\text{C}$, ambas adicionadas con 0.1% de xantana.

Esto puede contrastarse con los resultados obtenidos por Baiano et al. (2009) quienes reemplazaron harina de trigo *durum* tostado por harina blanca en concentraciones de 0, 5, 10, 15, 25 y 50% para el primer tipo de trigo; harina obtenida después de tostar el trigo en latas de hojalata a 250 °C por 35 a 45 s y 0, 5, 10, 15 y 25% de harina blanca del segundo tipo; harina obtenida después de tostar el trigo a fuego directo, la masa se fermentó para elaborar hogazas de pan de 750 g. Ellos encontraron que el pan control tuvo un mayor volumen y menor densidad de la miga y celdas de gas más grandes como consecuencia una miga más suave respecto de aquellas muestras que contenían trigo tostado.

Más adelante, en el análisis de imágenes, se discute el efecto de la temperatura de fermentación sobre la estructura de la miga.

La Tabla 3.4 muestra el comportamiento segmentado de la dureza respecto al tiempo, con 2 zonas para 30 °C y una zona para 40 °C. Para las muestras fermentadas a 30 °C se observó que el control y el pan con 0.1% de xantana presentaron dos zonas: la primera de 0 a 8 días y la segunda de 8 a 10 días, lo cual indica que el aumento de la dureza es relativamente más rápido en comparación con el pan con 0.5% de xantana. Por ello se puede decir que a medida que aumentó la concentración del hidocoloide, existió un comportamiento segmentado, es decir, en el cual la dureza aumentó en la primera zona y a medida que transcurrió el tiempo, la dureza tendió a hacerse constante.

En las masas fermentadas a 40 °C, se observó claramente una sola zona en la que el aumento de la dureza fue más lento a medida que la concentración de la xantana aumentó. En este sentido, se puede decir que la xantana actúa como “recubrimiento” de las paredes de la miga que envuelve los espacios de aire, y genera una miga más compacta (Guardado et al., 2004). Además, la xantana forma asociaciones inestables con el gluten, y aumenta la concentración de almidón en la fase donde está el gluten, lo que acelera la retrogradación del almidón (Mandala et al., 2007).

Tabla 3.4. Parámetros de regresión lineal de las dos zonas que describen el comportamiento del aumento de la dureza.

Xantana (%)	30 °C			40 °C		
	Zona	k	r ²	Zona	K	r ²
0	0 a 8 días	4.30	0.9716	0 a 10 días	4.23	0.9719
	8 a 10 días	6.04	1.0000			
0.1	0 a 8 días	2.56	0.9997	0 a 10 días	3.51	0.9717
	8 a 10 días	0.06	1.0000			
0.5	0 a 6 días	4.24	0.9929	0 a 10 días	3.07	0.9491
	6 a 10 días	0.40	0.9157			

Donde $k = dD/dt$ (N/días)

La Fig. 3.7 muestra el aumento relativo de la dureza, es decir, el cociente entre la dureza instantánea y la dureza inicial o al tiempo cero. La adición de xantana tuvo un efecto inesperado, ya que para el pan al que se le adicionó este hidrocoloide, la dureza aumentó más rápido con 0.1% seguido de 0.5%, lo que coincide con lo reportado con Sittu et al. (2009) quienes encontraron que al aumentar la concentración de xantana de 1 a 2%, en pan a base de trigo y yuca (10%), la dureza aumenta, ya que la adición de 1% de xantana es suficiente para producir cambios favorables en el pan, como mayor contenido de humedad y una miga de celdas más abiertas.

Para entender mejor el efecto de la temperatura de fermentación se puede comparar la dureza relativa ($D(t)/D(0)$) para la misma concentración de xantana y ambas temperaturas, 30 °C (a) y 40 °C (b). Por ejemplo, para 0.5% de xantana, la dureza relativa el día 10 a 30°C y 40 °C es 6.67 y 8.24, respectivamente, lo cual indica que una mayor temperatura de fermentación resultó una mayor dureza, ya que aumenta la actividad de la levadura, generando más CO₂ y como se explicó anteriormente, el gas se disipa más rápidamente al aumentar la temperatura y se forma una miga de celdas más grandes. Por otra parte la humedad relativa fue menor a 40 °C que a 30 °C, lo cual generó una masa menos húmeda y quizá un pan reseco y más duro.

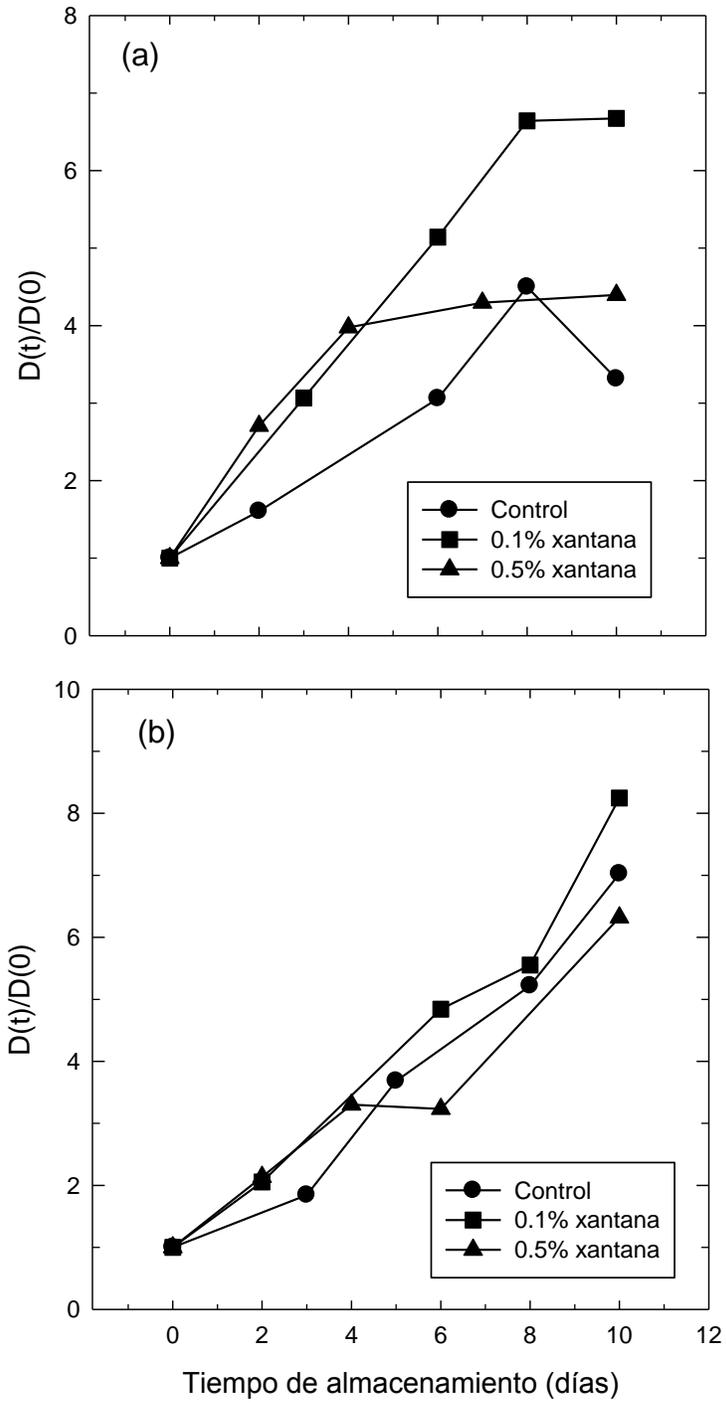


Fig. 3.7. Aumento relativo de la dureza del pan fermentado a 30 °C (a) y 40 °C (b).

3.2.2 Cohesividad

La cohesividad es una propiedad mecánica que mide la fuerza que existe entre los enlaces internos de un material (Baiano et al., 2009). De este hecho se puede partir para explicar las diferencias que se encontraron en este trabajo. La Tabla 3.5 muestra que al inicio, la temperatura de fermentación impactó sobre este parámetro ($p < 0.05$), ya que como se explicó anteriormente, a mayor temperatura de fermentación (40 °C), mayor tamaño de las celdas de gas en la miga, por lo tanto menor cohesividad. Por otra parte, se encontró que la adición de xantana tuvo un efecto positivo ($p < 0.05$) a partir de 0.1%.

Tabla 3.5. Cohesividad de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	Cohesividad inicial*	Cohesividad final
1	0.62 ± 0.02 ^{ac}	0.44 ± 0.05 ^a
2	0.58 ± 0.00 ^{bc}	0.34 ± 0.06 ^a
3	0.65 ± 0.01 ^{ad}	0.40 ± 0.05 ^a
4	0.61 ± 0.01 ^{ac}	0.39 ± 0.10 ^a
5	0.66 ± 0.10 ^{bd}	0.35 ± 0.10 ^a
6	0.37 ± 0.02 ^{bc}	0.37 ± 0.02 ^a

abc: diferente letra en la columna, indica diferencia significativa $p < 0.05$.

*a y b: corresponde a la diferencia por temperatura de fermentación

*c y d: corresponde a la diferencia por concentración de xantana

Lo cual concuerda con lo reportado por Demirkesen et al. (2014) quienes probaron la adición de diferentes hidrocoloides, metilcelulosa, agar, algarrobo, guar, xantana, CMC y HPMC, en una concentración de 0.5% en pan libre de gluten a base de harina de arroz, y encontraron que los panes adicionados con hidrocoloides, fueron más cohesivos que el control. Resultados similares encontraron Curti et al. (2014) quienes en lugar de hidrocoloides, adicionaron gluten en diferentes concentraciones (5 y 15%) y encontraron que éste también tiene un efecto positivo sobre la cohesividad del pan. Por el contrario, encontraron que durante el almacenamiento este efecto disminuye. Lo que concuerda nuevamente con los resultados obtenidos en este trabajo; en donde hubo una disminución en los valores de cohesividad, sin embargo, no se encontró diferencia

significativa ($p < 0.05$) entre las muestras, esta pérdida de cohesividad podría indicar que la muestra tiende a fracturarse (Demirkesen et al., 2014).

Las Figuras 3.8 y 3.9 muestran que la cohesividad disminuyó durante el almacenamiento. Se observa en general una tendencia decreciente, lo que significa que durante el almacenamiento la miga se “separa”. Para un mejor entendimiento, esto se observa en el análisis de imágenes.

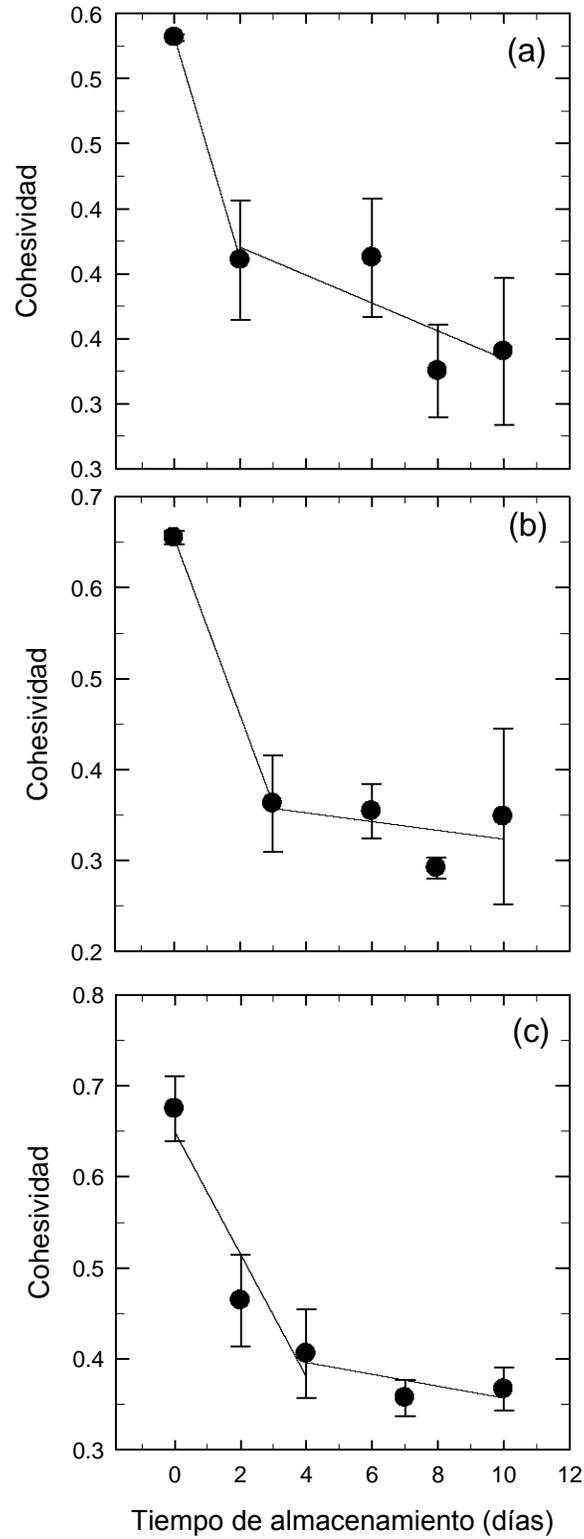


Fig. 3.8. Comportamiento de la cohesividad durante el almacenamiento de pan fermentado a 30 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

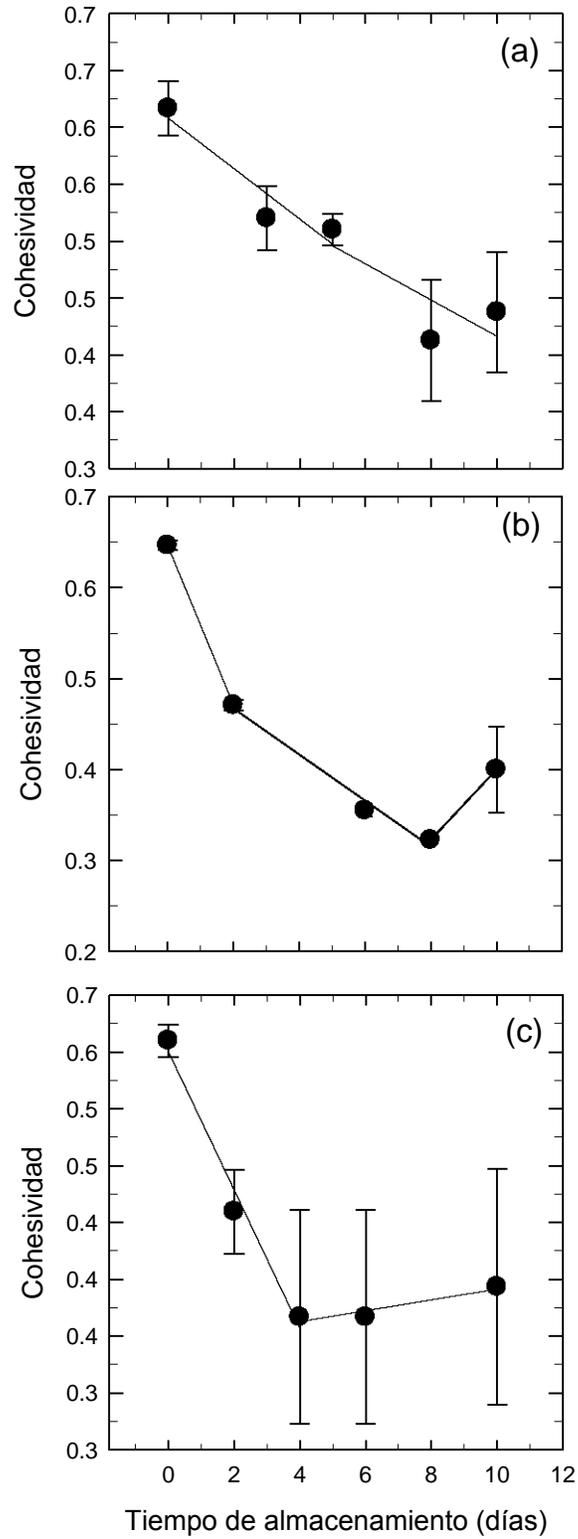


Fig. 3.9. Comportamiento de la cohesividad durante el almacenamiento de pan fermentado a 40 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

La Tabla 3.6 muestra los parámetros de regresión lineal de las muestras fermentadas a 30 y 40 °C.

Las masas fermentadas a 30 °C muestran dos zonas, de 0 a 2 días y de 2 a 10 días para la muestra control y 0.1% de xantana, y 0 a 6 días y 6 a 10 días para 0.5% de xantana, en las cuales se observó que para el control, la constante disminuye de una zona a otra, mientras que para las muestras adicionadas con 0.1 y 0.5% de xantana, ésta aumentó.

Para las muestras fermentadas a 40 °C la constante no mostró tendencia alguna, pues el control solo tuvo una zona. La muestra adicionada con 0.1% de xantana mostró 3 zonas, de 0 a 2 días, de 2 a 8 días y 8 a 10 días, en las cuales la constante disminuyó respecto al tiempo. Por otra parte la muestra con 0.5% de xantana tuvo dos zonas, de 0 a 6 días y de 6 a 10 días, en las cuales la pendiente se mantuvo igual en ambas zonas.

Tabla 3.6. Parámetros de regresión lineal de las dos zonas que describen el comportamiento de la cohesividad del pan.

Xantana (%)	30 °C			40 °C		
	Zona	K	r ²	Zona	k	r ²
0	0 a 2 días	0.086	1.0000	0 a 10 días	0.039	0.8897
	2 a 10 días	0.011	0.6359			
0.1	0 a 2 días	0.098	1.0000	0 a 2 días	0.088	1.0000
	2 a 10 días	4.798	0.1979	2 a 8 días	0.025	0.9848
				8 a 10 días	0.039	1.0000
0.5	0 a 6 días	0.067	0.9038	0 a 6 días	0.039	0.9817
	6 a 10 días	6.508	0.5754	6 a 10 días	0.039	0.8929

Donde k = dC/dt (días⁻¹)

3.2.3 Masticabilidad y Gomosidad

La masticabilidad se define como la energía necesaria para masticar el alimento hasta que esté listo para ser tragado (Demirkesen et al. 2014; Baiano et al. 2009); es una propiedad mecánica que mide la resistencia a la deformación. La Tabla 3.7 muestra que la masticabilidad aumentó durante el almacenamiento. Esto puede explicarse por medio de la investigación de Demirkesen et al. (2014) quienes encontraron en pan a base de harina de arroz, que la dureza está relacionada directamente con la masticabilidad y por el contrario con la elasticidad, es decir que al aumentar la primera, la segunda también se hace más grande, mientras que la elasticidad disminuye. Sin embargo ellos encontraron que la adición de hidrocoloides como xantana, guar, algarrobo, agar, metilcelulosa, CMC y HPMC en una concentración de 0.5% en el pan, es necesaria para disminuir este efecto, lo que no sucedió en este trabajo, ya que la adición de xantana no mostró efecto alguno sobre la masticabilidad final del pan.

Tabla 3.7. Masticabilidad (J) de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	Masticabilidad inicial	Masticabilidad final
1	0.053 ± 0.022 ^a	0.277 ± 0.023 ^a
2	0.070 ± 0.031 ^a	0.153 ± 0.043 ^b
3	0.041 ± 0.016 ^a	0.199 ± 0.002 ^a
4	0.046 ± 0.016 ^a	0.189 ± 0.074 ^a
5	0.030 ± 0.002 ^a	0.100 ± 0.010 ^b
6	0.049 ± 0.009 ^a	0.121 ± 0.071 ^b

abc: diferente letra en la columna, indica diferencia significativa $p < 0.05$

La gomosidad se define como el producto de la dureza por la cohesividad. Representa la fuerza requerida para romper el alimento semisólido antes de ser tragado (Baiano et al., 2009). La Tabla 3.8 muestra que al inicio no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las muestras. Sin embargo, se observó un aumento de la gomosidad durante el almacenamiento.

Tabla 3.8. Gomosidad (N) de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	Gomosidad inicial	Gomosidad final
1	4.24 ± 1.77 ^a	22.04 ± 1.78 ^a
2	5.61 ± 2.44 ^a	12.2 ± 3.36 ^b
3	3.29 ± 1.25 ^a	15.85 ± 0.13 ^a
4	3.70 ± 0.11 ^a	15.0 ± 5.89 ^a
5	2.42 ± 0.17 ^a	7.94 ± 0.76 ^b
6	3.89 ± 0.67 ^a	9.60 ± 5.61 ^b

abc: diferente letra en la columna, indica diferencia significativa $p < 0.05$

Se considera que la masticabilidad y la gomosidad siguen la misma tendencia que la dureza, es decir, decrecen de modo lineal con el tiempo. Las Figs. 3.10 y 3.12, de masas fermentadas a 30 °C, muestran que la masticabilidad y la gomosidad aumentaron con mayor rapidez en los primeros días de almacenamiento. Por el contrario, en las masas fermentadas a 40 °C (Fig. 3.11 y 3.13), estas mismas propiedades mecánicas aumentaron lentamente al inicio del almacenamiento y luego lo hicieron más rápido en los últimos días.

Las Figs. 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 muestran un aumento en la masticabilidad y en la gomosidad durante el envejecimiento del pan. Es importante entender que los parámetros de APT están relacionados entre sí; por lo que se puede decir que la masticabilidad y la gomosidad siguen la misma tendencia que la dureza ya que se determina como el producto de la dureza por la cohesividad por la elasticidad o la gomosidad por elasticidad. Por esta razón es que solo se encontró efecto de la temperatura de fermentación en el último día de almacenamiento (Tablas 3.7 y 3.8). Sería interesante hacer más réplicas, para disminuir el error y ver si efectivamente no existe efecto de la adición de xantana.

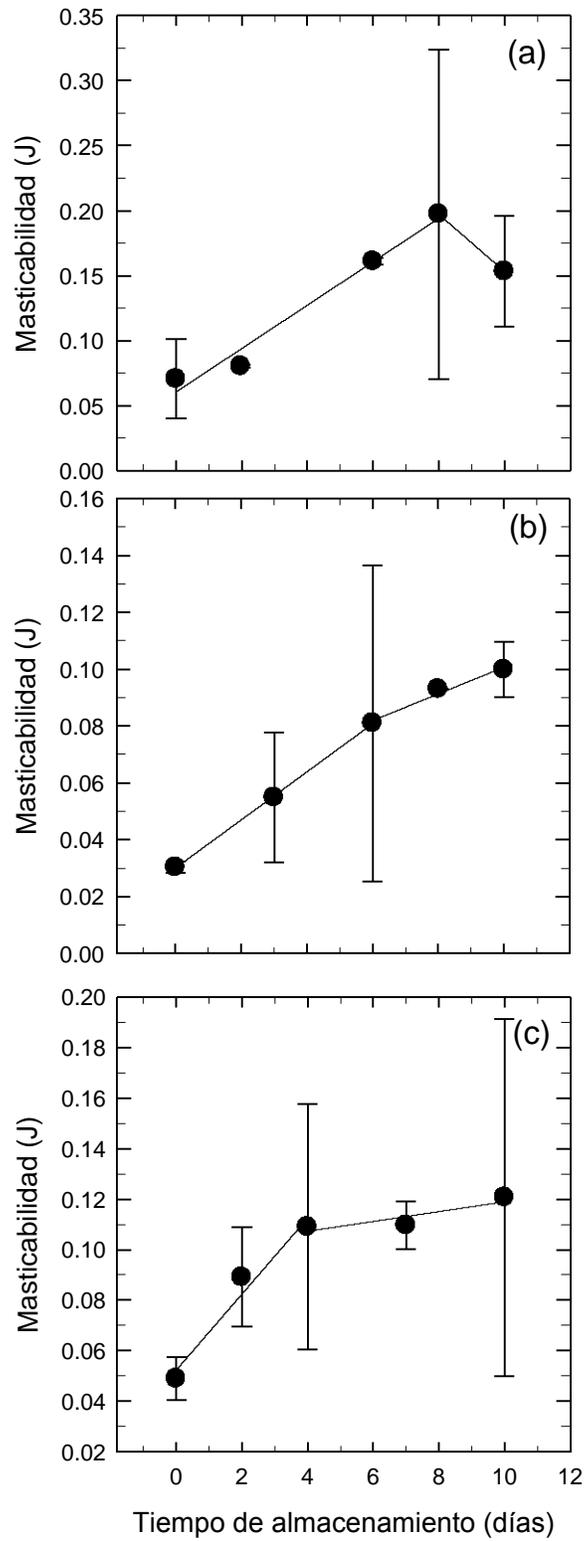


Fig. 3.10. Comportamiento de la masticabilidad durante el almacenamiento de pan fermentado a 30 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

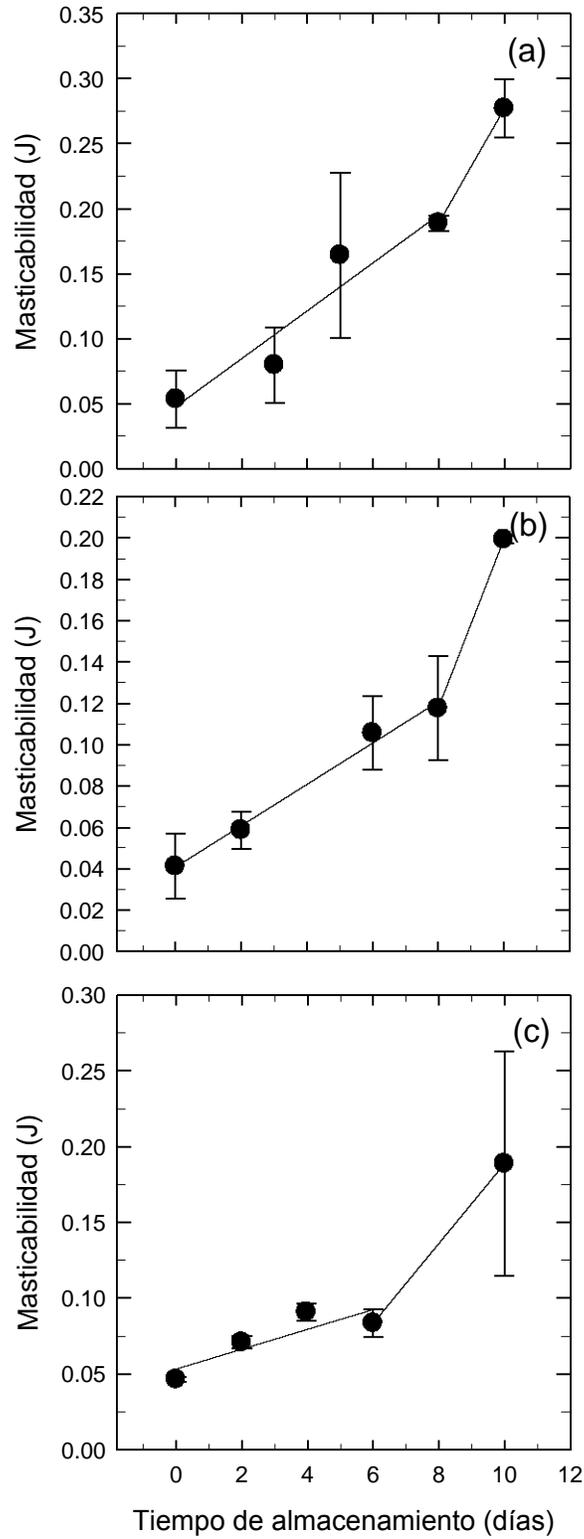


Fig. 3.11. Comportamiento de la masticabilidad durante el almacenamiento de pan fermentado a 40 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

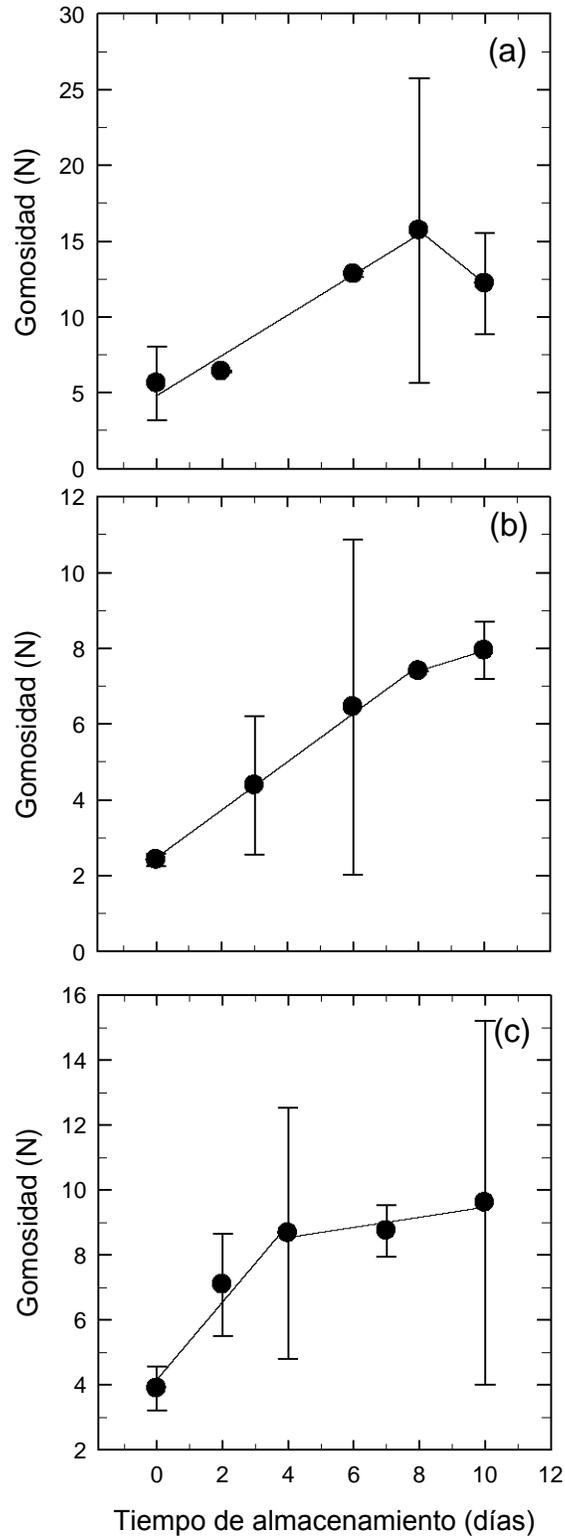


Fig. 3.12. Comportamiento de la masticabilidad durante el almacenamiento de pan fermentado a 30 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

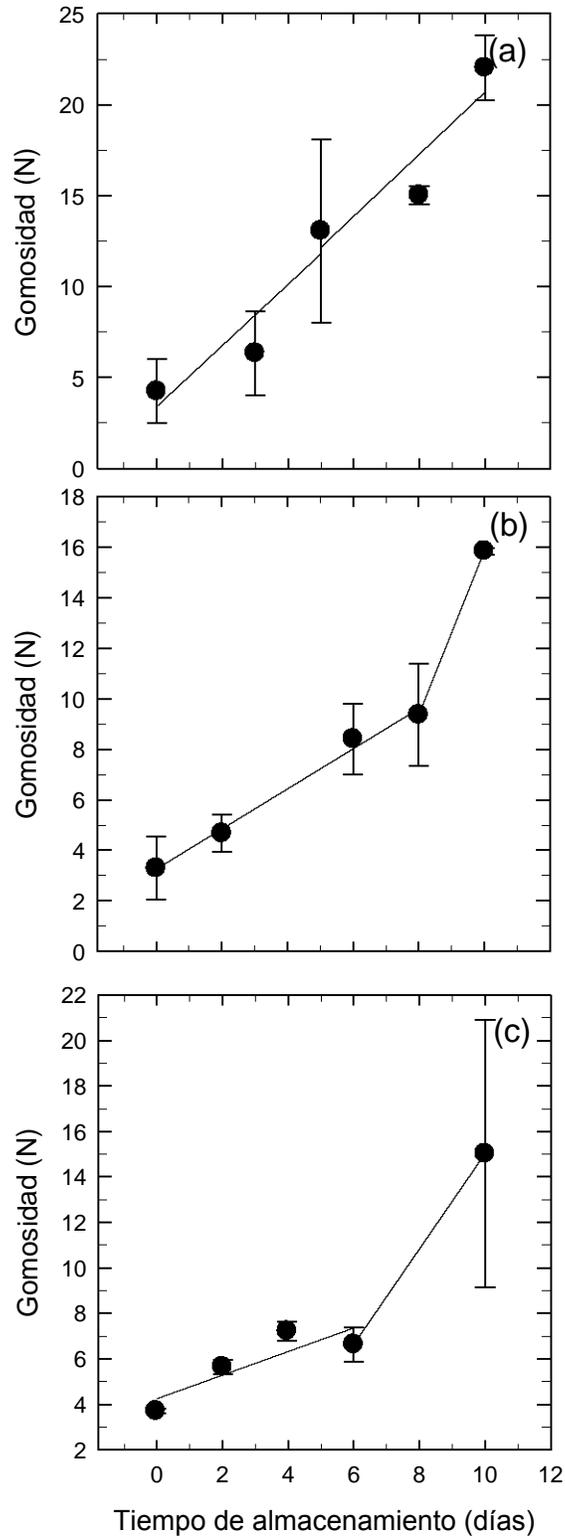


Fig. 3.13. Comportamiento de la masticabilidad durante el almacenamiento de pan fermentado a 40 °C (a) control, (b) 0.1% xantana y (c) 0.5% xantana.

Para describir los parámetros de la regresión lineal (Tablas 3.9 y 3.8) se observa un comportamiento lineal de dos zonas. En general la tasa de cambio de la masticabilidad o gomosidad no siguió una tendencia específica, ya que en algunos casos aumentó de una zona a otra y viceversa, independientemente de la temperatura de fermentación y de la concentración de xantana.

En la Tabla 3.9 se observa que la constante de masticabilidad de las muestras control aumentó de una zona a otra, mientras que para las muestras adicionadas con 0.1% de xantana, disminuyó. Para aquellas muestras adicionadas con 0.5% de xantana para 30 °C la constante aumentó y para 40 °C disminuyó.

Tabla 3.9. *Parámetros de regresión lineal de las dos zonas que describen el comportamiento de la masticabilidad del pan.*

Xantana (%)	30 °C			40 °C		
	Zona	K	r ²	Zona	K	r ²
0	0 a 8 días	0.017	0.9742	0 a 8 días	0.018	0.9055
	8 a 10 días	0.022	1.0000	8 a 10 días	0.044	1.0000
0.1	0 a 6 días	8.454	0.9997	0 a 8 días	9.993	0.9905
	6 a 10 días	4.697	0.9758	8 a 10 días	0.041	1.0000
0.5	0 a 6 días	0.015	0.9635	0 a 6 días	6.554	0.7552
	6 a 10 días	1.945	0.7902	6 a 10 días	0.026	1.0000

Donde $k = dM/dt$ (J/días)

Del mismo modo, en la Tabla 3.10, se observa que la constante de gomosidad en las muestras control a 30 y 40 °C aumentó ligeramente de una zona a otra, mientras que para las muestras de masa fermentada a 30 °C adicionadas con xantana 0.1 y 0.5% se observó una disminución de la constante. Por el contrario, en las muestras de masa fermentada a 40 °C aumentó.

Tabla 3.10. Parámetros de regresión lineal de las dos zonas que describen el comportamiento de la gomosis del pan.

Xantana (%)	30 °C			40 °C		
	Zona	K	r ²	Zona	k	r ²
0	0 a 8 días	1.329	0.9741	0 a 6 días	1.678	0.8414
	8 a 10 días	1.752	1.0000	6 a 10 días	1.706	0.8269
0.1	0 a 8 días	0.634	0.9963	0 a 8 días	0.794	0.9904
	8 a 10 días	0.269	1.0000	8 a 10 días	3.246	1.0000
0.5	0 a 6 días	1.195	0.9635	0 a 8 días	0.519	0.7532
	6 a 10 días	0.156	0.8894	8 a 10 días	2.098	1.0000

Donde $k = dG/dt$ (N/días)

3.3 Relación Humedad-Dureza

La Figura 3.13 muestra la relación que existe entre la humedad y la dureza, es decir, mientras la primera aumenta, la segunda disminuye con el tiempo. De acuerdo con investigaciones previas en pan elaborado a base de yuca y trigo y adicionado con xantana de 0 a 2%, almacenado a 28 °C y humedad relativa de 78 a 84 % por 96 horas, se encontró que ambos parámetros siguen una tendencia lineal (Shittu et al., 2009).

La Figura 3.14 muestra la relación lineal que existe entre la pérdida de humedad y el aumento de dureza. Se encontró que a mayor concentración de xantana la humedad final del pan fue mayor que el control y como consecuencia la dureza fue menor que el control en ambas temperaturas (30 y 40 °C). Esto se explica a través de la propiedad de la xantana al retener agua.

La pérdida de humedad se debe a la migración de agua a través de la miga hacia la costra del pan y se cree que es uno de los fenómenos que causa el endurecimiento de la miga; estos resultados concuerdan con Besbes et al. (2013) quienes probaron el efecto de dos condiciones de horneado (180 °C/34 min y 220 °C/28.6 min), y el almacenamiento (15 °C) en pan de caja, y usaron un modelo cinético de primer orden para expresar el envejecimiento y encontraron que la cinética es más rápida para aquellas muestras sometidas a mayor temperatura de

horneado. Esto se podría utilizar para explicar el efecto de la temperatura de fermentación en el último día de almacenamiento (Tabla 3.3), en donde a mayor temperatura de fermentación, la dureza aumentó más rápido.

Sin embargo, el aumento de la dureza de la miga, está más relacionado con la retrogradación de almidón.

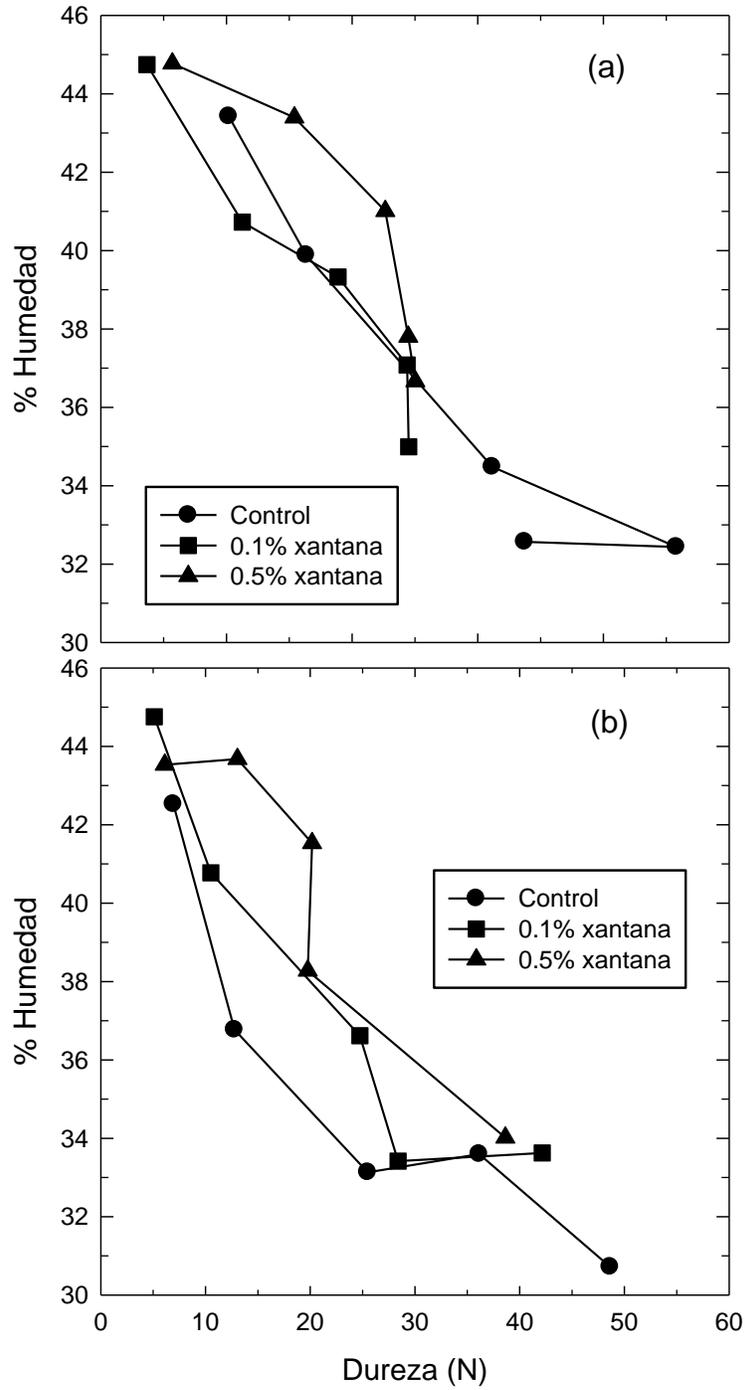


Fig. 3.14. Relación humedad-dureza del pan fermentado a 30 °C (a) y 40 °C (b).

3.4 Microcalorimetría diferencial de barrido

La gelatinización de almidón es la pérdida del orden molecular, i.e. colapso molecular, que se manifiesta dentro del gránulo de almidón. Esta transformación va acompañada de cambios irreversibles en sus propiedades como absorción de agua, hinchamiento del gránulo, fusión de la parte cristalina, aumento en la viscosidad y la solubilidad del gránulo. Estos son solo algunos de los cambios estructurales inducidos por tratamientos térmicos en el almidón (Rodríguez et al. 2001).

La Tabla 3.11 muestra la entalpía de transición al inicio y al final del almacenamiento, la cual aumentó con el tiempo como se muestra también en la Fig. 3.15. Esta transición puede atribuirse a la fusión de los cristales de almidón debida a una evolución con el tiempo y que probablemente esté asociada con la retrogradación del almidón. Sin embargo, sólo se encontró el efecto de la adición de la xantana a partir de una concentración de 0.1% ($p < 0.05$) en el último día de almacenamiento.

Sciarini et al. (2012) quienes encontraron que la presencia de hidrocoloides (xantana, CMC, alginato y κ -carragenina) no afecta el comportamiento de la gelatinización de almidón en el pan después del horneado, pues se cree que, los hidrocoloides en general compiten con el almidón para absorber agua por su afinidad con ella. Por otra parte, encontraron que la entalpía de transición térmica (ΔH) aumentó por la adición de hidrocoloides, indicando un aumento en la recristalización de la amilopectina durante el almacenamiento, mismo efecto que se observó en este trabajo.

Así mismo en la investigación de Sciarini et al. (2012) se manifestó la retrogradación del almidón, la cual se relacionó con el contenido de humedad (%), es decir, a mayor humedad mayor retrogradación de la amilopectina.

Tabla 3.11. Entalpía de transición endotérmica (J/s) de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.

Experimento	ΔH inicial	ΔH final
1	0.351 ± 0.017^a	0.417 ± 0.130^a
2	0.347 ± 0.121^a	0.616 ± 0.145^a
3	0.390 ± 0.110^a	0.739 ± 0.103^b
4	0.339 ± 0.016^a	0.728 ± 0.028^{ab}
5	0.335 ± 0.045^a	0.746 ± 0.025^b
6	0.198 ± 0.039^a	0.652 ± 0.090^{ab}

abc: diferente letra en la columna, indica diferencia significativa $p < 0.05$

Esto concuerda con la investigación de Curti et al. (2014) quienes probaron diferentes concentraciones de gluten (5 y 15%), el cual tiene un efecto similar al de los hidrocoloides, añadido a las formulaciones y encontraron que la retrogradación de amilopectina aumenta durante el almacenamiento ya que con la presencia del gluten hay menos agua en la fase del almidón y como consecuencia más almidón amorfo, menos desordenado en la matriz y más propenso a la recristalización.

Del mismo modo, el aumento de la entalpía de transición térmica se vio favorecida con el almacenamiento en refrigeración (8-8.5 °C), pues según Bosmas et al. 2013 a temperaturas bajas (4 a 14 °C) la retrogradación y la dureza de la miga ocurren más rápido.

Por el contrario, Guinoza et al. (2008) encontraron que la adición de xantana y goma guar disminuyen la entalpía de fusión de los cristales de amilopectina durante el almacenamiento de masa congelada.

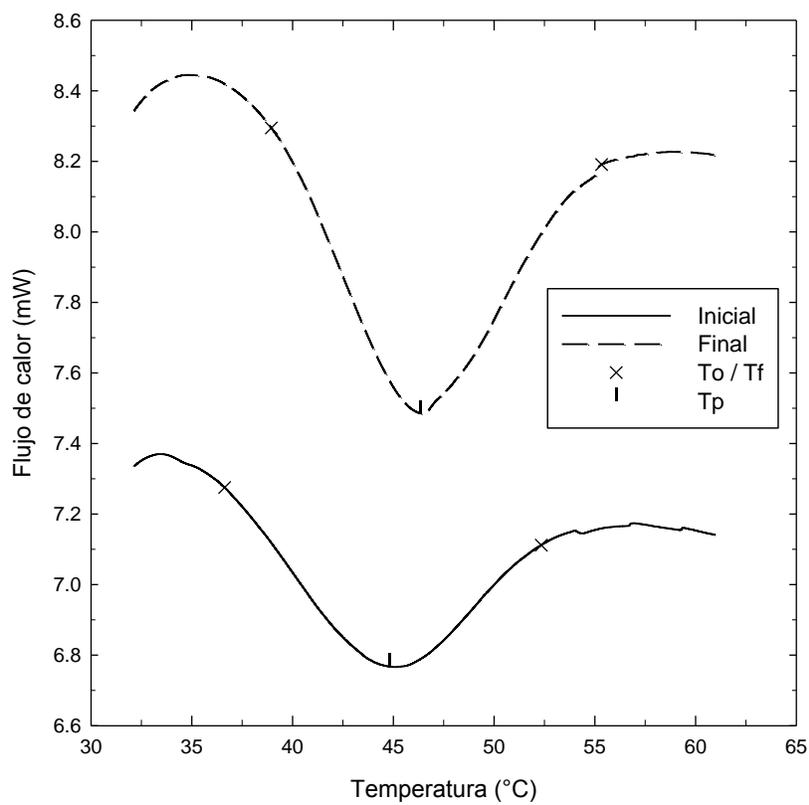


Fig. 3.15. Transición endotérmica del almidón al inicio y al final del almacenamiento, muestra Experimento 1 Lote 2.

En la Fig. 3.15, se observa un ejemplo del termograma que representa la transición endotérmica del almidón de los experimentos realizados en este estudio, en el cual se observa la temperatura de inicio (T_o) y la temperatura final de la transición (T_f), además de la temperatura de fusión (T_p), el área que se forma con estos tres puntos, es la entalpía de la transición (Tabla 3.12).

Tabla 3.12 *Parámetros de μ DSC de transición.*

Experimento		Inicial	Final
1	Tp (°C)	45.23 ± 0.60	45.31 ± 1.54
	To (°C)	37.31 ± 0.95	37.87 ± 1.53
	Tf (°C)	53.10 ± 1.07	54.17 ± 1.65
2	Tp (°C)	45.26 ± 0.68	43.91 ± 0.51
	To (°C)	37.51 ± 1.37	35.72 ± 0.42
	Tf (°C)	53.44 ± 3.61	51.99 ± 1.50
3	Tp (°C)	45.26 ± 1.16	41.51 ± 1.85
	To (°C)	36.43 ± 1.26	36.09 ± 3.03
	Tf (°C)	53.18 ± 0.50	46.75 ± 9.27
4	Tp (°C)	45.19 ± 0.13	48.34 ± 7.37
	To (°C)	36.95 ± 1.29	42.24 ± 10.72
	Tf (°C)	54.47 ± 3.11	55.29 ± 3.21
5	Tp (°C)	44.82 ± 0.11	43.55 ± 0.83
	To (°C)	35.32 ± 0.12	34.85 ± 0.71
	Tf (°C)	52.62 ± 0.55	54.72 ± 1.56
6	Tp (°C)	46.20 ± 2.61	43.89 ± 0.97
	To (°C)	36.95 ± 1.71	35.86 ± 2.08
	Tf (°C)	55.11 ± 2.66	52.86 ± 0.29

Otro parámetro que mide la estabilidad térmica del pan durante el envejecimiento, es la cristalinidad, la cual es una relación entre la entalpía de gelatinización de la harina con la entalpía de transición de la miga de pan. A medida que aumenta esta relación, más “viejo” es el pan, esto se debe al rearrreglo intermolecular de la amilopectina. En la Tabla 3.13 se muestra un aumento en el porcentaje de cristalinidad al final del almacenamiento, lo que concuerda con lo reportado por Primo-Martín et al. (2007) quienes evaluaron los cambios de la cristalinidad en pan tostado de trigo, a través de calorimetría diferencial de barrido y encontraron retrogradación de almidón en un intervalo de temperatura de 55 a 60°C, en la costra y en la miga del pan a los veinte días de almacenamiento.

Tabla 3.13. *Cristalinidad del almidón (%) de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento.*

Experimento	D_{RC} inicial	D_{RC} final
1	18.86 ± 0.960 ^a	23.60 ± 7.363 ^a
2	19.61 ± 6.843 ^a	34.83 ± 8.204 ^a
3	22.04 ± 6.203 ^a	41.82 ± 5.843 ^b
4	19.19 ± 0.880 ^a	41.20 ± 1.601 ^b
5	18.96 ± 2.561 ^a	42.19 ± 1.401 ^b
6	11.18 ± 2.201 ^a	36.87 ± 5.082 ^b

abc: diferente letra en la misma columna indica diferencia significativa ($p < 0.05$).

Por otra parte, en los resultados del último día de almacenamiento se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las muestras control y aquellas adicionadas con xantana, en las cuales se observa que al aumentar la concentración del hidrocoloide, aumentó el porcentaje de cristalinidad.

3.5 Análisis de imágenes

En la Fig. 3.16 se observa que en general la estructura de la miga fue heterogénea debido a que las celdas de gas son de diferente tamaño.

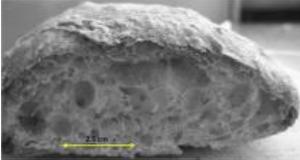
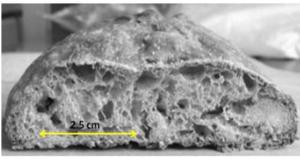
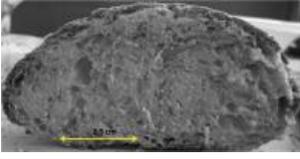
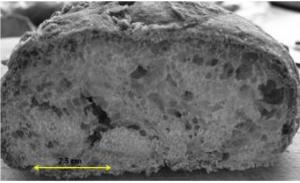
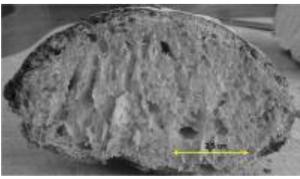
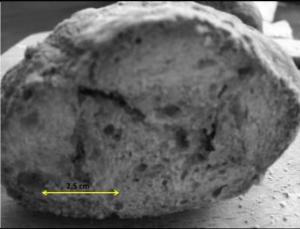
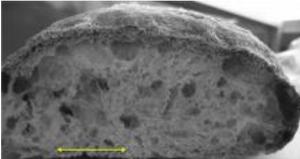
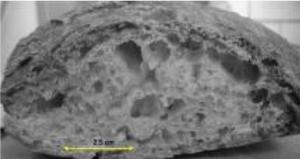
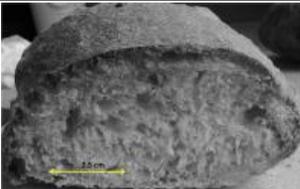
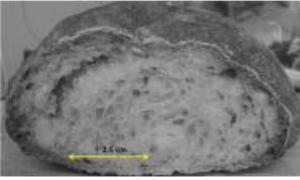
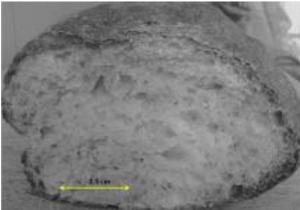
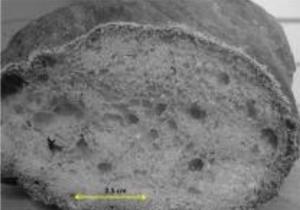
Experimento	Día 0	Día 10
40 °C, 0% xantana		
40 °C, 0.1% xantana		
40 °C, 0.5% xantana		
30 °C, 0% xantana		
30 °C, 0.1% xantana		
30 °C, 0.5% xantana		

Fig. 3.16. Estructura de la miga del pan al inicio y al final del almacenamiento. La línea horizontal es una referencia de 2.5 cm.

Los panes con masa fermentada a 40 °C, mostraron una estructura más abierta, es decir, celdas de gas más grandes que los de masa fermentada a 30 °C, lo cual puede explicarse como que a mayor temperatura, el CO₂ se dilata más y provoca las burbujas de gas coalescan formando celdas más grandes, lo que hace que la masa colapse y se genere un pan de poca altura y diámetro grande, miga con celdas de gas de tamaño heterogéneo la cual se consolida durante el horneado. Por otra parte, comparando las muestras control, es decir, los panes sin xantana, contra aquellos que contienen el hidrocoloide en alguna concentración (0.1 o 0.5%), se observa que a medida que aumentó su concentración, el tamaño de las celdas de gas disminuyó, haciendo la estructura de la miga más homogénea y compacta, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Ozge et al. (2009) quienes estudiaron el efecto de la adición de diferentes gomas (xantana, guar, κ-carragenina, y una mezcla de xantana-guar) en una concentración de 0.5% en la macro y micro estructura de pan para hamburguesa horneado en dos tipos de hornos; convencional y de luz infrarroja y encontraron que la adición de una goma en general, evita la coalescencia de las celdas de gas, dando lugar a una morfología más estable. La adición de hidrocoloides, como xantana y CMC, protege la superficie de los gránulos de almidón formando una capa a su alrededor lo cual disminuye la absorción de agua y reduce la lixiviación de amilosa debilitando la interacción entre la red de gluten y las cadenas de amilosa (Mohammadi et al. 20014). Por otra parte se encontró que la xantana aumenta la uniformidad de la microestructura de la miga en pan para hamburguesa y pan libre de gluten a base de harina de arroz, respecto a otros hidrocoloides como CMC, κ-carragenina y guar (Mohammadi en al. 2014; Ozge en al. 2009). Del mismo modo, Demirkesen et al. (2014) caracterizaron la estructura de panes libres de gluten utilizando rayos X y microtomografía y encontraron que la adición de hidrocoloides como xantana, guar, algarrobo, agar, metilcelulosa, CMC y HPMC, imparte mayor estabilidad a la masa durante el horneado ya que modifican el comportamiento reológico; aumenta la elasticidad y flexibilidad de la masa, formando una miga más homogénea.

De acuerdo con este estudio, la adición de xantana produce una miga homogénea y celdas de gas de menor tamaño respecto al control, lo cual se contrapone con el estudio realizado por Shittu et al. (2009) en el cual se encontró que al adicionar xantana en una concentración de 1% se produce un pan de mayor altura, con una miga de celdas más grandes en comparación al control y al pan con una concentración de 2%. Del mismo modo los resultados de la investigación de Sciarini et al. (2012) muestran que la adición de κ -carragenina y xantana, en panes libre de gluten presenta un número menor de celdas de gas por milímetro cuadrado menor que otros hidrocoloides como CMC y alginato, pues las celdas son más grandes; como consecuencia estas muestras mostraron los valores más bajos de uniformidad de la miga.

En la Figura 3.16 se observa también que la miga en el día 10 presentó grietas, lo cual se debe a la pérdida de humedad de la miga (Scanlon & Zghal 2001) y a su contracción, lo cual puede deberse a la reorganización de los biopolímeros contenidos en la miga, cuando se almacena a temperaturas por arriba de 0 °C, debido a la recristalización de la amilopectina y como consecuencia una mayor rigidez en la matriz celular (Besbes et al., 2014). Como complemento para entender el efecto de la adición de xantana, se observa en la Figura 3.17 que el diámetro de la hogaza disminuyó y aparentemente la altura aumentó, lo que coincide con la investigación de Guarda et al. (2004) quienes probaron diferentes hidrocoloides, alginato de sodio, xantana, κ -carragenina y HPMC, en el pan a base de harina de trigo como agentes mejoradores o agentes anti-envejecimiento y encontraron que la forma de la hogaza se ve afectada por la suplantación de hidrocoloides. La κ -carragenina y la xantana producen un aumento en el la relación ancho/alto. Sin embargo, para comprobar que existe un cambio en el volumen de la hogaza se sugiere medirlo, ya que en el trabajo realizado por Sciarini et al. (2012) la muestra control y aquella adicionada con xantana mostraron el mismo volumen.

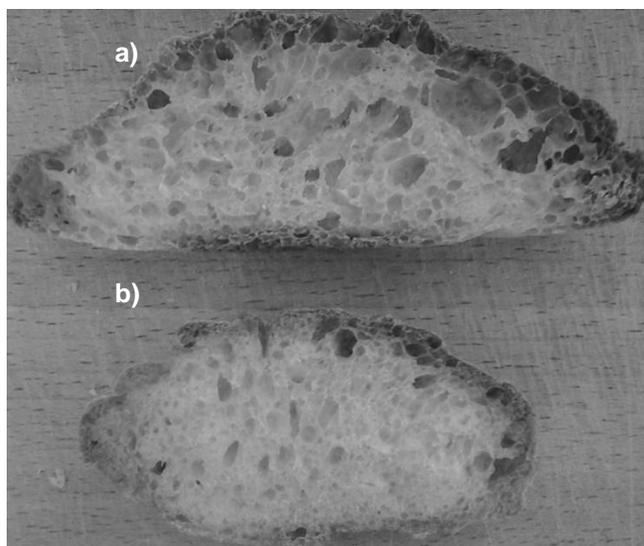


Fig. 3.17. Efecto de la xantana sobre el tamaño de la hogaza: a) pan sin xantana y b) pan con 0.5% de xantana.

CONCLUSIONES

En este trabajo, la humedad de la miga y su dureza, fueron las variables más sensibles al envejecimiento.

Se encontró una relación directa entre la temperatura de fermentación y la estructura de la miga, a mayor temperatura (40 °C) se produjo una miga heterogénea, de celdas de gas grandes y como consecuencia una mayor pérdida de humedad, produciendo una miga más dura, ya que durante el almacenamiento ésta se volvió reseca y agrietada.

La adición de xantana favoreció la estructura de la miga, haciéndola más homogénea, de celdas pequeñas, por lo que disminuyó la pérdida de humedad durante el almacenamiento, sin embargo, no se encontró efecto sobre las propiedades mecánicas. Por ello se puede decir que con respecto a la pérdida de humedad, la vida de anaquel del pan mejoró.

De aquí que las mejores condiciones de elaboración de pan en este trabajo fueron: fermentación de la masa a 30 °C y adición de xantana al 0.5%.

Por otra parte, en cuanto a la estabilidad térmica, la adición de xantana favoreció la retrogradación de almidón, aumentando la entalpía de transición térmica. Por lo que el endurecimiento de la miga se le atribuyó a la pérdida de humedad y a la retrogradación de almidón. Como consecuencia, se encontró un aumento en la cristalinidad durante el almacenamiento. Desde el punto de vista de la estabilidad térmica, la adición de xantana disminuyó la vida de anaquel del pan.

TRABAJO FUTURO

Hacer el análisis sensorial de aceptación para determinar las condiciones aceptables para el consumidor y contrastar los resultados con las pruebas mecánicas para determinar las mejores condiciones de elaboración del pan, con el fin de determinar si la adición de xantana es viable para una futura comercialización.

Se recomienda probar otros hidrocoloides, como por ejemplo HPMC, CMC, guar y κ -carragenina, que han sido estudiados en otras investigaciones. Es recomendable determinar el volumen de la hogaza por medio de la técnica de desplazamiento de semillas, para encontrar el efecto de los hidrocoloides sobre el volumen del pan.

De igual manera, escanear rebanadas de pan, para determinar el tamaño de las celdas de gas y definir la homogeneidad de la estructura de la miga. Asimismo, comparar el efecto de los distintos hidrocoloides sobre ésta. Se sugiere hacer pruebas de comportamiento reológico de la masa, para predecir el comportamiento de las propiedades mecánicas del pan.

REFERENCIAS

- Badui, S.; 2006. *Química de alimentos*. México. Pearson Educación. 4a. edición.
- Baiano, A., Romaniello, R., Lamacchia, C., Ennio, N., 2009. Physical and mechanical properties of bread loaves produced by incorporation of two types of toasted durum wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 95, 199-207.
- Besbes, E., Jury, V., Monteau, J., Bail, A., 2014. Effect of beaking conditions and storage with crust on the moisture profile, local textural properties and staling kinetics of pan bread. *LWT-Food Science and Technology*, 58, 658-666.
- Birch, A., van den Berg, F., Hansen, A., 2013. Expansion profiles of wheat doughs fermented by seven commercial baker's yeast. *Journal of Cereal Science*, 58, 318-323.
- Bosmas, G., Lagrain B., Firens, E., Delcour, J., 2013. The impact of beaking time and storage temperature on bread crumb properties. *Food Chemistry*, 141, 3301-3308.
- Bourne, M., 1978. Texture Profile Analysis. *Food technology*. 32, 62-67
- Calaveras, J.; 2004. Nuevo tratado de Panificación y bollería. Madrid. AMV Ediciones. 2ª edición.
- Codex alimentarius. [En línea] Disponible en: <http://www.codexalimentarius.net/gsfaonline/additives/details.html?id=48> [última consulta 15/10/15 7:22 p.m.]
- Curti, E., Carini, E., Tribuzio, G., Vittadini, E., 2014. *LWT- Food Science and Technology*, 59, 418-425.
- Demirkesen, I., Kelkar, S., Campanella, O., Sumnu, G., Sahin, S., Okos, M., 2014. *Food Hydrocolloids*, 36, 37-44.
- Dendy, D.; 2004. Pan un alimento único. En: Bogdan, J., Grant, M., Zhilin, G. eds. Cereales y productos derivados. Química y tecnología. Zaragoza. Acribia. Capítulo 8.

- Fessas, D. & Schiraldi, A., 1998. Texture and staling of wheat bread crumb: effects of water extractable proteins and pentosans. *Thermochimica Acta*, 323, 17-26.
- Forkish, K., 2012. *Flour Water Salt Yeast: The Fundamentals of artisan USA. Bread and Pizza.* Ten Speed Press.
- García Acosta Virginia, 1989. [en línea] Disponible en:
http://www.estudioshistoricos.inah.gob.mx/revistaHistorias/wp-content/uploads/historias_19_75-82.pdf [última consulta 8/01/15 a las 6:30 p.m.]
- Guarda, A., Rosell, C., Benedito, C., Galotto, M., 2004. *Food Hydrocolloids*, 18, 241-247.
- Guinoza, T., Chevallier, S., de Alcantara, P., LeBail, A., Tadini C., 2008. Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough. *Journal of Cereal Science*, 48, 741-746.
- http://www.inaes.gob.mx/doctos/pdf/guia_empresarial/panificacion.pdf consultado 8/01/15 a las 7:58 p.m.
- Iemeson, a.; 1992. *Thickening and Gelling Agents for Food*. New York, USA. Blackie academic & Professional.
- Kent, N.L.; 1971. *Tecnología de los cereales*. España. Editorial Acribia.
- Kelco, Division of Merck & Co. Technical Bulletin, DB-33. Xanthan Gums for Food and Pharmaceutical applications.
- Luna-Fernández, M., 2011. Envejecimiento del pan: Causas y soluciones. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 5-2,40-53.
- Mohammadi, M., Sadeghnia N., Azizi M., Neyestani, T., Mortazavian, A., (2014). Development of gluten-free bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20, 1812-1818.
- Montoya, J., 2010. Caracterización Físico-Química de Harina de Trigo, Masa y Pan. 29-35
- NMX-F-159-S-1983. Alimentos. "Pan blanco de caja". Normas Mexicanas. Dirección General de Normas.

- Ozge. S., Sumnu, G., Sahin, S., 2009. The effects of gums on macro and micro-structure of breads bakes in different ovens. *Food Hydrocolloids*, 23, 2182-2189.
- Primo-Martín, C., van Nieuwenhuijzenm N., Hamer, R., van Vliet, T., 2007. Crystallinity changes in wheat starch during the bread-making process: Starch crystallinity in the bread crust. *Journal of cereal Science*. 45, 219-226.
- Quaglia G., 1991. Ciencia y tecnología de la Panificación. Zaragoza. Editorial Acribia. 2ª Edición.
- Rodríguez, P., San Matín, M., Gonzalez, G., 2001. Calorimetría diferencial de barrido y rayos X- del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada. *Sociedad Mexicana de la Ciencia de Superficies y Vacío*, 13, 61-65.
- Romani L. (2006) [en línea]
Disponible en:
<http://www.enciga.org/files/boletins/56/Calorimetria.pdf> [última consulta 23/09/14 5:59 p.m.]
- Rosenthal, A., 2001. Relación entre medidas instrumentales y sensoriales de la textura de los alimentos. En: Textura de los alimentos medida y percepción. Zaragoza. Acribia. Capítulo 1.
- Scanlon, M. & Zghal, M., 2001. Bread properties and crumb structure. *Food Research International*. 34, 841-864.
- Sciarini, L., Ribotta, A., León, A., Pérez, G., 2012. Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*. 111, 590-597.
- Serra, A., 2010. *Libro blanco del Pan*. España. Médica Panamericana.
- Shittu, T., Aminu, R., Abulude, E. (2009). Functional effects of xanthan gum on composite cassava-wheat dough and bread. *Food Hydrocolloids*, 23, 2254-2260.
- Simpson, B., 2012. Food Biochemistry and Food Processing. Iowa. Wiley-BlackWell. 2º edition.
- Stanley, P., 1998. Fabricación de pan. Zaragoza. Acribia.

- Stölman, U. & Lundgren, B., 1987. Texture Changes in White Bread: Effects of Processing and Storage. *Cereal Chemistry*, 64, 230-235.
- Tendencias de consumo e innovación en panificados por Euromonitor Internacional. [En línea] (Actualizado al 13/11/2009) Disponible en:
<http://www.alimentacion.enfasis.com/articulos/14982-tendencias-consumo-e-innovacion-panificados> [última consulta 8/01/15 7:09p.m.]

ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

- **ANOVA: ANálisis DE Varianza**
- **APT:** Análisis de Perfil de Textura
- **Control:** Muestra de referencia, sin adición de xantana
- **Gelatinización de almidón:** Proceso endotérmico, donde los gránulos de almidón en presencia de agua, cambian de estado.
- **Gluten:** Conjunto de proteínas presentes en algunos cereales, principalmente en el trigo.
- **Hidrocoloides:** son un grupo de compuestos químicos que se caracterizan por un elevado peso molecular. Su origen puede ser vegetal, animal, microbiano y sintético. Tiene la función de retener mucha agua por formación de puentes de hidrógeno por lo que contribuyen a la estabilidad y mejora de las características sensoriales de un producto,
- **μCDB: Micro Calorimetría Diferencial de Barrido**
- **Retrogradación de almidón:** Rearreglo intramolecular de las cadenas de amilopectina.
- **Xantana:** Polisacárido de origen bacteriano, con diferentes aplicaciones en la industria de alimentos.

ANEXO 1

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE KELTROL T®

Propiedades fisicoquímicas	
Composición	Xantana de grado alimenticio
Color	Crema a blanco
Presentación	Polvo
Tamaño de partícula	100% a través de malla 60 (250 µm) 95% a través de malla 80 (180 µm)
Ph	7.0 ± 1.0
Viscosidad	1200- 1600 cP (1% de xanana en 1% de disolución de KCl)
Plomo	< 5 ppm
Arsénico	< 3 ppm
Humedad	6- 14%

Datos de: KELCO- DIVISIÓN DE MERCK & CO., INC

- **Preparación de la disolución**

La xantana se hidrata en la mayoría de los sistemas a base de agua, ya que son completamente solubles tanto en agua fría como en caliente. Las disoluciones se preparan generalmente agregando el Keltrol T en polvo en el agua con agitación suficiente para lograr una separación física de las partículas.

- **Información para aplicación farmacéutica y en alimentos**

La xantana es reconocida como un aditivo bajo la normatividad de la Food and Drug Administration (FDA), 21 CFR 172.695, para uso como estabilizante, espesante o emulsificante. La xantana esta designada con el código E415 de la Comunidad Económica Europea.

- **Aplicaciones en alimentos** (Imeson, 1992)

Producto	Función
Aderezos	Estabiliza la emulsión aceite-agua.
Salsas	Aumenta la viscosidad, actúa como espesante.
Productos lácteos	Mejora la textura. En helado, controla la formación de cristales de hielo.
Crema para batir y espumas	Estabiliza las celdas de aire.
Bebidas	Espesa y proporciona cuerpo.
Productos de panadería	Mejora la homogeneidad de la masa. Reduce la pérdida de humedad durante el horneado y el almacenamiento. Aumenta el volumen del producto.
Jarabes, toppings y rellenos	Mejora y estabiliza la textura del producto.
Alimento para mascota	Mejora la textura del producto.