



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**“PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PAN INTEGRAL: EFECTO
DE LA ADICIÓN DE XANTANA SOBRE SU ENVEJECIMIENTO “**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA
ADRIANA PINEDA GARCÍA



MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: Juan Diego Ortiz Palma Pérez**

VOCAL: **Profesor: Alberto Tecante Coronel**

SECRETARIO: **Profesor: Gloria Díaz Ruiz**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Francisco Ruiz Terán**

2º SUPLENTE: **Profesor: Esmeralda Paz Lemus**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO 313, CONJUNTO E. DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA,
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

ASESOR DEL TEMA:

DR. ALBERTO TECANTE CORONEL

SUSTENTANTE:

ADRIANA PINEDA GARCÍA

INDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ANTECEDENTES	7
2.1 TRIGO.....	7
2.2 EL PAN	9
2.2.1 ORÍGENES DEL PAN.....	9
2.2.2 PAN INTEGRAL.....	11
2.2.3 FUNCIONALIDAD DE INGREDIENTES.....	11
2.2.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DEL PAN.....	17
2.3 ENVEJECIMIENTO DEL PAN	21
2.3.1 ALMIDÓN: GELATINIZACIÓN Y RETROGRADACIÓN	22
2.4 DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL PAN.....	25
2.4.1 TEXTURA	25
2.4.2 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO	27
2.5 XANTANA.....	28
2.5.1 ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA XANTANA.....	29
2.5.2 PROPIEDADES.....	29
2.5.3 APLICACIONES EN ALIMENTOS.....	30
3. OBJETIVOS	34
4. MATERIALES Y MÉTODOS	35
4.1 MATERIALES	35
4.2 ELABORACIÓN DE PAN.....	36
4.3 EVALUACIÓN DEL PAN.....	39
4.3.1 ESTRUCTURA DE LA MIGA.....	39
4.3.2 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD.....	40
4.3.3 DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA.....	41
4.3.4 CALORIMETRÍA DE BARRIDO DIFERENCIAL	41

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
5.1 ESTRUCTURA DE LA MIGA	43
5.2 HUMEDAD	46
5.3 ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA.....	52
5.3.1 DUREZA	52
5.3.2 ELASTICIDAD	58
5.3.3 COHESIVIDAD	60
5.3.4 MASTICABILIDAD	60
5.3.5 GOMOSIDAD	60
5.4 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO	64
6. CONCLUSIONES.....	67
7. RECOMENDACIONES	68
8. REFERENCIAS.....	69

RESUMEN

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de pan integral preparado en el laboratorio siguiendo una formulación base, sin y con adición de xantana y con dos diferentes temperatura de fermentación de la masa, con el fin de retardar el envejecimiento de este alimento. Las concentraciones de xantana fueron 0.1 y 0.5%, y las temperaturas de fermentación 30 y 40 °C. Se prepararon lotes por duplicado de cada formulación, así como controles para cada temperatura. Los panes fueron almacenados en bolsas de plástico con cierre hermético y en refrigeración por diez días. Se determinó el cambio en el contenido de humedad, el perfil de textura, la estructura de la miga los días 1, 3, 5, 8 y 10 de almacenamiento y calorimetría diferencial de barrido los días 2 y 10. Existe una disminución en el contenido de humedad conforme pasan los días de almacenamiento, un aumento en la dureza y en la cristalinidad atribuida a la retrogradación de almidón. Sobresalió la combinación de 0.5% de xantana con 40 °C, la cual presentó mayor humedad y menor dureza en el último día de almacenamiento.

ABSTRACT

The physical and mechanical properties of whole-flour bread prepared in the laboratory following a base formulation, without and with addition of xanthan with two different temperatures of fermentation of dough, in order to retard aging of this food were evaluated. Xanthan concentrations were 0.1 and 0.5% and the fermentation temperature 30 to 40 °C. Duplicate batches were prepared for each formulation and temperature, and controls for each as well. Breads were stored in plastic bags with sealing and cooled for ten days. Changes with storage time in moisture content, texture profile, crumb structure along 1, 3, 5, 8 and 10 days of storage and differential scanning calorimetry in day two and ten, were monitored. There was a decrease in moisture content moisture along storage time, hardness and crystallinity attributed to starch retrogradation increased. The combination of 0.5% xanthan at 40 °C, which had a higher moisture and lower hardness on the last day of storage, revealed itself as the best condition.

1. INTRODUCCIÓN

El pan es un producto perecedero que resulta de la cocción de una masa obtenida al mezclar harina de trigo, sal y agua y fermentar con especies de microorganismos como *Saccharomyces cerevisiae*, en la cual coexisten distintos componentes como hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Por ello la selección y aceptación de este alimento están determinadas por sus atributos sensoriales como su aspecto, olor, sabor y textura. Los cambios indeseables que ocurren en los productos de panificación después de hornear la masa son importantes debido a la producción en gran escala. El envejecimiento del pan tiene efecto sobre la economía de la industria panadera y del consumidor, ya que grandes cantidades de pan se desechan debido a este problema. Es por esto que en la producción comercial de pan se han desarrollado estrategias para tratar de extender su vida de anaquel. El empleo de aditivos es una práctica común en la panificación ya que mejoran las propiedades de la masa, aumentan la calidad del pan fresco e incrementan su vida de anaquel durante el almacenamiento por lo que se han utilizado con éxito como agentes que retardan el envejecimiento.

Con base en estas consideraciones generales, el objetivo de este trabajo, fue determinar de qué manera la inclusión de xantana en concentraciones de 0.1 y 0.5% en la formulación de una masa, afecta las características finales de un pan hecho a base de harina de trigo integral, en combinación con diferentes temperaturas de fermentación; 30 y 40 °C, de la masa. Una vez elaborado, el pan fue almacenado en bolsas de plástico con cierre hermético en refrigeración por 10 días. Las respuestas evaluadas fueron el cambio en la humedad, el perfil de textura, la estructura de la miga y la retrogradación de almidón por calorimetría diferencial de barrido.

2. ANTECEDENTES

2.1 TRIGO

Desde el inicio de la civilización, el trigo ha sido uno de los cereales más importantes en la alimentación humana. El trigo es una planta gramínea anual con espiga. Su altura es variable, va desde treinta centímetros hasta un metro y medio. El tallo, recto, cilíndrico, da unas hojas largas y finas que terminan en forma de lanza, por lo

que se les llama lanceoladas. Cada planta tiene cuatro a seis hojas. El grano de trigo es ovalado, parecido al arroz, con las puntas redondeadas. De una de ellas sobresale el germen y en la otra hay un mechón de pelos finos que por su forma se conoce como pincel.

El trigo se desarrolla en climas subtropicales, templados o ligeramente fríos. Las plantas requieren una cantidad moderada de agua, entre 229 y 762 milímetros de lluvia. La temperatura mínima para que crezca bien es de 13 °C (SAGARPA, 2014). Para propósitos comerciales, el trigo se clasifica de acuerdo con la dureza del grano, época de cultivo, primavera o invierno, color del pericarpio, rojo o blanco, y su contenido de proteína. Los trigos de invierno y de primavera, se dividen por la fuerza del gluten en fuertes y débiles. Los trigos fuertes son más vítreos y contienen más proteína que los débiles, lo que da lugar a una masa altamente elástica, la cual puede retener el dióxido de carbono, ideales para la industria de la panificación (Kent, 1971; Márquez, 2001; Ambrosio, 2011).

La estructura del grano de trigo (Figura 1), está compuesta por el pericarpio, el germen o embrión y el endospermo.

- El pericarpio o salvado está formado por las capas más externas del grano y sus células tienen un alto contenido de celulosa y hemicelulosa; hidratos de carbono no digeribles.
- El germen o embrión, el cual se encuentra situado en la parte inferior del grano, es rico en grasas no saturadas y por esta razón es eliminado de la harina con el fin de evitar su rancidez.
- Por último, el endospermo, en cuyas células se almacenan proteínas de reserva y energía en forma de almidón. El endospermo, es la porción del grano de la cual se obtiene harina blanca. Contiene 72% de la proteína del grano, como aquellas formadoras de gluten, y también contiene grandes cantidades de almidón, es rico en vitaminas del complejo B y en minerales (Hoseney, 1991).

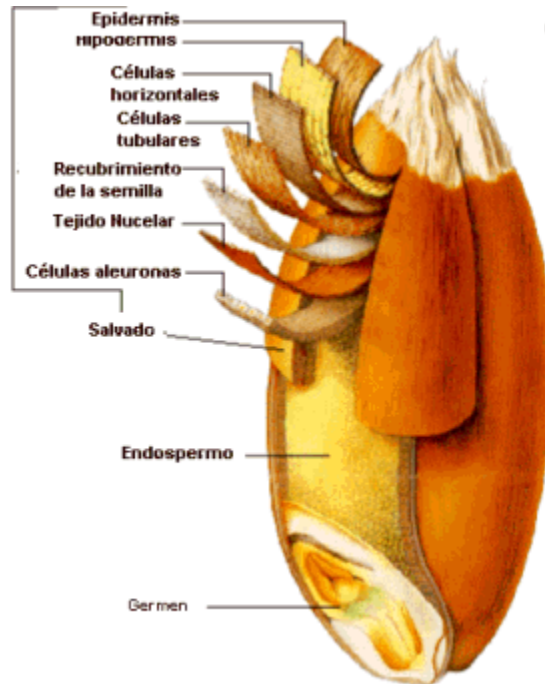


Figura 1. Estructura del grano de trigo (Borneo, 2013).

La composición del trigo puede variar según la zona y el año de la cosecha. En la Tabla 1 se presenta el intervalo de los principales componentes de la composición química del grano de trigo.

Tabla 1. Composición química del grano entero de trigo (Steffolani, 2010; FAO, 2014).

COMPONENTE	COMPOSICIÓN (%)
Proteínas	7.0 – 18.0
Lípidos	1.5 – 2.0
Hidratos de carbono	60.0 – 71.0
Fibra cruda	2.0 – 2.5
Minerales	1.5 – 2.0
Humedad	8.0 – 18.0

2.2 EL PAN

2.2.1 ORÍGENES DEL PAN

El uso de la harina de trigo para elaborar pan es una de las formas de biotecnología más antiguas de la humanidad, su origen se remonta a épocas prehistóricas en las

cuales existen evidencias de su uso por diferentes civilizaciones como en el antiguo Egipto (Figura 2), Grecia y, más tarde, por los romanos (Álvarez y Vallejos, 2001; Serna, 2001).

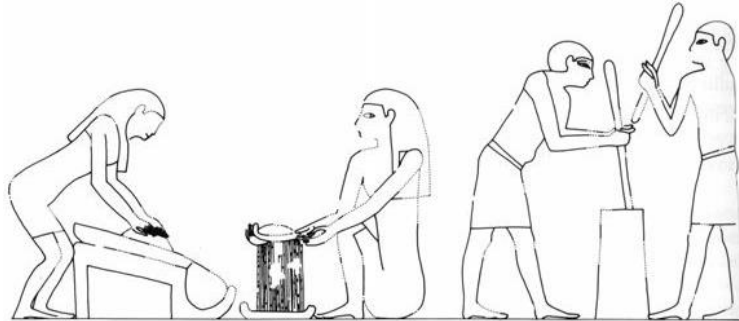


Figura 2. Elaboración de pan en el antiguo Egipto, según una representación hallada en la tumba del faraón Intef-inker, de la dinastía XII, en Tebas. A la derecha dos hombres están rompiendo los granos de trigo con pilones en un mortero. En el centro se observa a una mujer tamizando el producto obtenido y, a la izquierda, otra mujer realizando una molienda fina con un molinillo de mano en forma de silla de montar (Álvarez y Vallejos, 2001).

El pan es un producto perecedero que resulta de la cocción de una masa obtenida al mezclar harina de trigo, sal comestible y agua potable, y fermentada por especies de microorganismos propias de este tipo de fermentación como *Saccharomyces cerevisiae*. En él coexisten diversos componentes muy reactivos como los hidratos de carbono, las proteínas y los lípidos, además de numerosas y diferentes actividades enzimáticas. Por ello, el resultado final dependerá de las materias primas que utilicemos y de las condiciones en que se lleve a cabo el proceso (Ávila et al., 2007; Torres et al., 2011). Los productos de panificación han ido evolucionando en diferentes formas y características distintivas. Cada país ha desarrollado su método de panificación tradicional de acuerdo con la calidad de la materia prima y las características exigidas por los consumidores. El término “pan” es utilizado para describir una amplia gama de productos con diferentes formas, tamaños, textura, corteza, color, aroma y sabor (Steffolani, 2010).

Para que un pan sea considerado de buena calidad debe alcanzar suficiente volumen, aspecto atractivo, tanto en forma como en color y una miga finamente vesiculada y suficientemente blanda para permitir una fácil masticación, pero al mismo tiempo suficientemente firme para que se le pueda cortar en rebanadas. (Kent, 1971). Los principales ingredientes empleados en la elaboración de pan son: harina de trigo, agua, sal y levadura. Existe una gran cantidad de ingredientes para mejorar su sabor, textura y vida de anaquel que son empleados para fabricar pan como azúcar, grasas, leche o derivados, huevo, conservadores, surfactantes, hidrocoloides, entre otros (Kent, 1971; Hosney, 1991).

2.2.2 PAN INTEGRAL

El pan integral está compuesto de harina no refinada que tiene más salvado, su textura es menos fina que la del pan común. Se denomina integral porque posee una gran cantidad de fibra dietaria en comparación con el pan blanco (Tabla 2). Su consumo se ha ido incrementando desde finales del siglo XX, debido a que proporciona importantes beneficios a la salud.

Tabla 2. Composición química del pan integral y del pan blanco (FAO, 2014).

COMPUESTO	PAN INTEGRAL	PAN BLANCO
Agua (g)	41.7	38.3
Energía (kcal)	198	232
Proteína (g)	7.0	7.6
Hidratos de carbono (g)	41.4	47.8
Grasa (g)	0.9	1.2
Fibra (g)	7.5	3.5
Sodio (mg)	380	540

2.2.3 FUNCIONALIDAD DE INGREDIENTES

2.2.3.1 INGREDIENTES BÁSICOS

- **HARINA**

La harina es el componente más importante, que generalmente se utiliza entre 60-66% del total de la formulación y es la responsable de formar junto con el agua la masa viscoelástica que retiene el gas incorporado durante el amasado y producido en la fermentación. Consta básicamente de un cereal o una mezcla de ellos, que ha

sido molido finamente hasta hacerlo polvo, por regla general es sólo el endospermo del cereal (Hoseney, 1991; Ambrosio, 2011). El 85% de las proteínas de las harinas son gliadinas las cuales proporcionan una cualidad pegajosa a la masa y las gluteninas que proporcionan resistencia y fortaleza. Son unas proteínas insolubles que en conjunto reciben el nombre de gluten debido a su capacidad de aglutinarse cuando son mezcladas con agua, originando una red o malla. Esta propiedad que poseen las proteínas del trigo y que no poseen las proteínas de otros cereales, es la que hace panificables las harinas de trigo y la que proporciona las características plásticas de la masa del pan (Torres et al., 2011). Para preparar pan, la harina debe proceder en gran proporción de trigos fuertes. Una buena harina para pan se caracteriza por tener algunas propiedades especiales: proteína en cierta cantidad y de calidad satisfactoria, fuerza y estabilidad, adecuada producción de gas y actividad amilásica, satisfactorio contenido de humedad, no superior de 14% para poder almacenarla con seguridad, y buen color (Kent, 1971).

- **AGUA**

El agua es el elemento fundamental para formar la masa, disolver los ingredientes, y permitir su total incorporación. También es necesaria para formar y desarrollar el gluten, hidratar los gránulos de almidón para que empiecen a gelatinizar, y sirve además como medio para activar las enzimas y la levadura.

El agua controla:

- 1) La temperatura de la masa.
- 2) La fermentación, para disolver la levadura y que comience a actuar.
- 3) Y hace factible las propiedades de plasticidad y extensibilidad de la masa, de modo que pueda crecer por la acción del gas producido durante la fermentación.
- 4) El sabor y la frescura: la presencia de agua hace posible la porosidad y el buen sabor del pan. Una masa con poca agua resultará en un producto seco y quebradizo. Los almidones hidratados al ser horneados se hacen más digeribles. La

corteza del pan es más suave y la humedad del pan le da la frescura característica (Dubois, 1990; Baños, 2007; Márquez, 2001).

- **SAL**

La sal se suele utilizar en porciones pequeñas pero es de gran importancia en las características del pan.

1) Aporta sabor al pan, acentuando sabores o mejorando su balance.

2) La sal actúa como regulador del proceso de fermentación, previene una acción excesiva de la levadura, especialmente en masas de fermentación prolongada.

3) Posee un efecto de inhibición sobre la actividad de otros microorganismos, por ejemplo, bacterias productoras de ácido.

4) Tiene un efecto sobre las propiedades reológicas de la masa, fortalece y endurece el gluten, debido a la interacción directa de la sal con las proteínas de la harina. El uso de la sal ayuda a vencer las posibles dificultades encontradas con masas flojas y pegajosas evitando su excesiva adherencia.

5) Favorece la coloración y finura de la corteza. En panes sin sal se observa una corteza pálida y poco brillante. Al controlar la acción de la levadura, se regula el consumo de azúcares y se produce así una mejor corteza. La porción de sal a agregar es como máximo 2% sobre la materia seca. La proporción de sal se recomienda sea mayor en harinas recién molidas o débiles (Kent, 1971; Dubois, 1990; Hosney, 1991; Márquez, 2001).

- **LEVADURA**

En la elaboración de productos de panificación, la levadura es el componente microbiano que se agrega a la masa, cuya acción enzimática es importante por su capacidad para descomponer, mediante fermentación, diversos compuestos orgánicos, principalmente el almidón, con la producción de etanol y CO₂. La levadura

más utilizada en panificación es la especie *Saccharomyces cerevisiae*. Esta levadura tiene la facultad de desarrollarse en condiciones anaeróbicas y llevar a cabo una fermentación alcohólica, y es utilizada además en otros muchos procesos de fermentación industrial como en la producción de cerveza, vino, antibióticos, entre otros, obtenidos industrialmente, mediante cultivo de cepas puras en medios idóneos para su multiplicación (Torres et al., 2011).

Las principales funciones de la levadura son las siguientes:

- 1) Convertir los hidratos de carbono fermentables en dióxido de carbono y etanol. Los gases que se producen en esa conversión, proporcionan la expansión y maduración de la masa. La levadura logra esta acción mediante el rompimiento inicial de los azúcares, como la sacarosa, no fermentable, que por acción de la invertasa la cual está en la pared celular de la levadura, forma azúcares fermentables, como la glucosa, fructosa y manosa. La fermentación alcohólica puede ser definida en términos generales como la conversión enzimática de hidratos de carbono en etanol y dióxido de carbono, como productos principales; el proceso se lleva a cabo en condiciones anaerobias. Se estima que 95% de la glucosa es convertida en etanol y CO₂, liberando energía en forma de calor.

- 2) Producir sustancias que colaboran en la modificación de las estructuras de las proteínas de la harina, gluten, de forma que las paredes celulares estén capacitadas para retener el CO₂ producido. La reducción de la fermentación tiene como consecuencia la pérdida de elasticidad en la masa.

- 3) Desarrollar parte del aroma y el sabor, mediante la producción de alcoholes y aromas típicos de la panificación como ésteres, ácido acético, butírico y láctico (Hoseney, 1991; Márquez, 2001).

2.2.3.2 INGREDIENTES OPCIONALES

- **AZÚCARES**

El azúcar añadido tiene tres funciones básicas, impartir sabor, color y ser un sustrato fermentable por la levadura. Los azúcares más utilizados son la sacarosa, jarabes hidrolizados de almidón o maíz. Los azúcares imparten un sabor dulce y son responsables del desarrollo del color típico vía reacciones de Maillard (Hoseney, 1991; Serna, 2001).

- **GRASAS**

El pan al que se le han añadido grasas se observa más flexible, permanece blando y conserva la palatabilidad durante periodos de tiempo más largos.

Otras propiedades importantes para la panificación son:

- 1) Suaviza la estructura del gluten.
- 2) Lubrica y mejora la estructura de la miga y la firmeza de la corteza, extendiendo la vida útil del producto (Márquez, 2001).
- 3) Proporciona un incremento significativo de volumen, generalmente del orden de 10%.
- 4) Emulsiona la grasa, repele el agua, pero al interaccionar con moléculas de agua producen un efecto emulsionador.
- 5) Aumenta su valor calórico (Hoseney, 1991).

- **LECHE Y DERIVADOS**

Hace unos años, la leche era un ingrediente común en el pan, pero en la actualidad, la leche se ha convertido en un ingrediente caro. Por consiguiente, hoy en día se utiliza muy poco o no se utiliza. También se han buscado derivados de leche que pueden resultar más baratos, formados principalmente de suero, sustitutos en polvo

como caseinato de sodio, leche descremada, fosfato de calcio, entre otros (Gianola, 1985; Hosney, 1991). El añadir leche al pan hace que exista un aumento en la calidad del pan, aporta valor nutricional y mejora la textura y color de la corteza.

- **HUEVO**

Los beneficios del uso de huevo en los productos de panificación son:

1) Aporte a la estructura debido a la gran cantidad de proteínas con la propiedad de formar una espuma estable que es capaz de sostener a otros ingredientes.

2) Aumenta el aporte nutricional dado que es fuente rica en proteínas de alta calidad que aporta aminoácidos esenciales, vitaminas (A, D, E, K, vitaminas del complejo B12) y minerales (hierro, fósforo y calcio).

3) Proporciona color y sabor a los productos. Ocurren reacciones de oscurecimiento con azúcares reductores (Márquez, 2001; Serna, 2001).

- **CONSERVADORES**

Los conservadores se utilizan para evitar o prolongar el crecimiento de microorganismos, ya que alteran sus membranas celulares, su actividad enzimática o sus mecanismos genéticos. Se utilizan en bajas concentraciones que van desde 0.1-0.5% dependiendo del producto. Los conservadores más utilizados son los sorbatos, los benzoatos o los propionatos.

- **HIDROCOLOIDES**

Los hidrocoloides son extensamente usados en la industria de alimentos ya que son capaces de controlar las propiedades reológicas y de textura de la masa y del producto final, reducen la actividad de agua debido a que compiten por el agua con la fracción de proteína y almidón en el producto, modifican la gelatinización del almidón, extienden la calidad de los productos durante el almacenamiento y comúnmente son utilizados como sustitutos para panes libres de almidón (Shittu et al., 2009). Los hidrocoloides más utilizados en panadería son la xantana, la guar, la

hidroxipropilmetil celulosa (HMPC), la κ -carragenina, la carboximetil celulosa y la goma arábica (Selomulyo & Zhou, 2007).

2.2.4 PROCESO DE ELABORACIÓN DEL PAN

El proceso de elaboración de pan resulta en numerosos cambios físicos y químicos debido a la transformación de los ingredientes en las diferentes etapas del proceso. Existen diferentes metodologías que se han adaptado en la elaboración de pan para cumplir con las demandas del consumidor y para facilitar el trabajo de panificación. Algunos de los métodos más utilizados son el método convencional, método de esponja, masa congelada, masas en tiempo, principalmente (Rosell, 2011). La diferencia entre cada método radica en el equipo empleado, las características finales del producto y el tiempo; sin embargo, existen etapas comunes como el mezclado, la fermentación, el horneado y el enfriado.

Las etapas más importantes para preparar el pan artesanal objeto de este estudio son:

- **MEZCLADO**

El mezclado es una de las principales etapas que determina las propiedades mecánicas de la masa y que tiene una consecuencia directa sobre la calidad final del producto. Esta etapa consiste en incorporar y distribuir todos los ingredientes, hidratar la harina de trigo, proveer la energía necesaria para desarrollar la red de proteínas e incorporar aire a la masa (Rosell, 2011). Cuando se mezclan los ingredientes en proporciones adecuadas para formar una masa comienzan dos procesos:

- 1) La proteína de la harina comienza a hidratarse al combinarse con una parte del agua. El gluten, que posee propiedades peculiares, se puede estirar como una sustancia elástica y cohesiva (Kent, 1971). En algunas ocasiones se utiliza el “Método de Autólisis” el cual es un periodo de descanso después de la mezcla inicial de harina y agua, que permite una mejor absorción de agua, y ayuda a que el gluten y los almidones se alineen. Las masas con este proceso se desarrollan

mejor con un tiempo de mezclado más corto, aumenta su extensibilidad por lo que son más fáciles de moldear, tienen más volumen y una mejor estructura (Forkish, 2012).

2) Una vez integrado el resto de los ingredientes comienza la formación de CO₂ por acción de las enzimas de la levadura sobre los azúcares (Hoseney, 1991).

Si el mezclado es excesivo, las propiedades de la masa son pobres, i.e. floja y pegajosa, y se observa poca consistencia la cual es atribuida a la debilidad de la red de proteínas. Por el contrario, si el mezclado es insuficiente, la red no se desarrolla adecuadamente. La masa para pan debe ser un material viscoelástico que exhibe un comportamiento reológico intermedio, entre un líquido viscoso y un sólido elástico, lo suficientemente extensible y elástico para la expansión y retención de los gases (Scanlon & Zghal, 2001; Rosell, 2011).

- **FERMENTACIÓN**

La fermentación se inicia cuando se pone en contacto la levadura con la masa de harina y agua, y comienzan a metabolizarse los primeros azúcares libres existentes en la harina, y prosigue sin interrupción hasta que la temperatura en el horneado detiene la actividad microbiana (Márquez, 2001). El objetivo de la fermentación es producir una hogaza ligera, aireada, con aroma y sabor agradables. La fermentación consiste en una serie de reacciones bioquímicas llevadas a cabo por la levadura en la cual la glucosa y la fructosa fermentan convirtiéndose en CO₂, que esponja la masa, y alcohol. Esta fermentación se realiza en varias etapas y es producida por un considerable grupo de enzimas, alfa amilasa y beta amilasa, y coenzimas sobre los hidratos de carbono. Consideradas en conjunto como una diastasa, maltasa, invertasa y zimasa de la levadura (14 enzimas).

El almidón de la harina se transforma en el disacárido maltosa por la acción de la enzima amilasa; la maltosa se desdobla en glucosa por acción de la maltasa; la sacarosa se desdobla en glucosa y fructosa por la invertasa; la glucosa y la fructosa fermentan convirtiéndose en gas carbónico y alcohol bajo la acción del complejo

zimasa. La alfa amilasa ataca las uniones alfa-1:4, glucosídicas, de la amilosa y la amilopectina liberando porciones no reductoras, pero es incapaz de atacar las uniones 1:6 de las cadenas laterales de la molécula de amilopectina. Como consecuencia del ataque de la alfa-amilasa sobre el almidón queda un residuo de dextrinas, de bajo peso molecular llamadas amilasas dextrinogénicas. La beta-amilasa, amilasa sacarogénica, ataca las uniones alfa-1:4 de la amilosa y la amilopectina, pero sólo puede hacerlo a partir del extremo no reductor de la molécula, y produce la separación de dos unidades de glucosa cada vez en la forma de maltosa. En ausencia de la alfa-amilasa, la beta-amilasa rompe aproximadamente una tercera parte de la amilopectina, dejando un residuo muy resistente de dextrinas de elevado peso molecular, dextrina límite. Sin embargo, en presencia de la alfa-amilasa, la beta-amilasa es incapaz de renovar sus ataques sobre las terminaciones no reductoras de las porciones de moléculas liberadas por el ataque de la alfa-amilasa (Kent, 1971).

Como resultado de la fermentación se obtiene:

- Producción de dióxido de carbono gas que levanta la masa. La retención de gas es una propiedad característica de las proteínas de la harina; el gluten, a la vez que es lo suficientemente extensible para permitir la expansión del pan, debe ser lo suficientemente fuerte para evitar que el gas se escape con demasiada facilidad.
- Producción de numerosos compuestos orgánicos como ésteres, compuestos carbonílicos, y demás, que influyen en el aroma y el sabor del pan.
- Modificación de las propiedades químicas de la masa que conducen a su maduración, llevándola a ser más elástica y pegajosa.

- **DIVISIÓN Y MOLDEADO**

La división es el primer paso en el manejo de la masa después de cumplir el tiempo de fermentación y consiste en cortar la masa en piezas individuales en el tamaño deseado y el moldeado consiste en dar a la pieza una forma simétrica. La masa ideal

para dividir debe ser flexible y fluir suavemente sin alteraciones de fermentación. Una vez que las piezas tienen la forma y tamaño deseado, se colocan en una charola o molde previamente engrasado y se dejan reposar por determinado tiempo, este tiempo es la última etapa de la fermentación conocida como “proofing” (Forkish, 2012).

- **PROOFING**

Esta etapa es la fermentación final de las hogazas ya formadas. Durante este periodo la levadura continúa produciendo gas permitiendo que la masa se eleve más antes de hornear. Si se horneara inmediatamente después del moldeado, el pan sería de volumen pequeño, denso y de textura áspera.

- **HORNEADO**

Concluido el periodo de fermentación, la masa de pan es elástica, no fluye y está lista para la cocción. La temperatura del horno y el tiempo de cocción varían según el tipo y tamaño de pan, normalmente la cocción se hace entre 200-275 °C y entre 15-45 minutos. Al colocar la masa relativamente fría dentro del horno caliente, empiezan a suceder cambios físicos, químicos y biológicos rápidamente. Durante las etapas iniciales del horneado, la masa incrementa su volumen y la altura dado que la levadura todavía produce gas y el CO₂ se expande por el notable incremento de temperatura, este incremento varía con el peso, la forma y la calidad de la masa, generalmente la etapa de crecimiento en el horno dura menos de 10 minutos. (Hoseney, 1991). Al llegar a una temperatura de 65 °C, la actividad de la levadura y de algunas enzimas cesa y al mismo tiempo comienza la gelatinización del almidón, y se pierde la capacidad de retención de agua, con lo cual la masa pierde su consistencia plástica y toma una forma rígida. La elevada elasticidad de la masa junto con una elevada capacidad de retención, da lugar a un pan muy grande y con bajo peso específico. Por el contrario, una masa con escasa elasticidad o una pequeña capacidad de retención de gas, debido a una malla de gluten rígida y seca, resulta en un pan de poco volumen, con una miga aglomerada y celdas no homogéneas (Márquez, 2001; Serna, 2001).

Durante la cocción, además de la evaporación de agua, también ocurre la volatilización del alcohol etílico y de sustancias aromáticas como aldehídos, éteres, ácidos, entre otros. La superficie de la masa expuesta al ambiente del horno se seca rápidamente y forma la corteza casi inmediatamente. La presencia de azúcares reductores y grupos amino libres con altas temperaturas propicia que la costra del pan adquiera su color dorado resultante, estas son conocidas como reacciones de Maillard (Hoseney, 1991; Serna, 2001; Baños, 2007). En la Tabla 3 se resumen todos los cambios que ocurren durante la etapa de horneado del pan de acuerdo con la temperatura interna de la hogaza.

Tabla 3. Fenómenos físicos y químicos durante el horneado del pan (Quaglia, 1991).

TEMPERATURA (°C)	FENÓMENOS EN EL INTERIOR DE LA MASA
30	Expansión de los gases y producción enzimática de azúcares provenientes de la harina.
40	Inicio de hinchamiento del almidón.
50-60	Aumento de actividad enzimática, inicio de la disolución del almidón.
60-70	Inicio de la desnaturalización de proteínas.
60-75	Final de la gelatinización del almidón.
65-85	Muerte de la levadura e inactivación de enzimas.
100	Desarrollo y producción de vapor de agua, formación de la corteza.
140-150	Reacciones de Maillard. Formación de melanoidinas.
150-200	Producto crujiente y aromático.

2.3 ENVEJECIMIENTO DEL PAN

Cuando el pan sale del horno presenta una corteza crujiente, una miga suave, húmeda y que no se desmorona. Con el paso del tiempo, estas características sufren diferentes cambios físicos en la textura, como el ablandamiento de la corteza, que es

consecuencia de la difusión de agua de la miga hacia la corteza y por la absorción de humedad del medio ambiente. Por otra parte, la miga se endurece, se compacta y se desmorona fácilmente. A estas alteraciones indeseables se les conocen como envejecimiento del pan, y causan que el producto no sea aceptado por el consumidor. La vida de anaquel de los productos de panificación es de aproximadamente 10 días, sin embargo, varía de acuerdo con cada formulación (Novotni, 2011). El endurecimiento de la miga del pan no es un proceso de desecación, ya que no está relacionado directamente con la pérdida de humedad, sino con la transición del almidón de una estructura amorfa a un estado cristalino. La retrogradación está directamente relacionada con el envejecimiento del pan, porque durante el cocimiento del pan, parte de la amilosa se difunde fuera del gránulo y retrograda en el momento de su enfriamiento, de tal manera que los restos de gránulo, ahora ricos en amilopectina, se ven rodeados por moléculas de polímero lineal; se considera que el envejecimiento se debe a la asociación de cadenas de amilopectina dentro del gránulo, después de haber perdido parte de la amilosa (Kent, 1971; Hosenev, 1991). El almacenamiento del pan a temperaturas bajas retrasa el envejecimiento químico, y cuanto más baja es la temperatura utilizada mejor es el resultado. Se ha establecido que $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ es una temperatura muy adecuada, pero cuando este pan recobra la temperatura ambiente pronto envejece, como de costumbre.

2.3.1 ALMIDÓN: GELATINIZACIÓN Y RETROGRADACIÓN

Las propiedades funcionales del pan están influenciadas por las proteínas y el almidón. La formación de geles y la retrogradación del almidón en dispersiones acuosas o disoluciones, son de gran relevancia para la industria de alimentos y son algunas de las causas del deterioro de los productos, reflejado en cambios de textura durante su elaboración (Montoya et al., 2012). El almidón se encuentra almacenado principalmente en el endospermo y por consiguiente es el hidrato de carbono mayoritario de la harina de trigo. Es un polímero cuya estructura molecular se basa en la unión de moléculas de glucosa insolubles en agua, que están unidas entre ellas

mediante enlaces α -D-(1-4) y α -D-(1-6), formando sus dos macromoléculas principales:

La **amilosa**, polímero lineal de glucosa que supone aproximadamente la cuarta parte del almidón, en el cual las glucosas están unidas por enlaces glucosídicos α -1,4, y forma una red tridimensional cuando se asocian las moléculas al enfriarse y es la responsable de la gelificación.

La **amilopectina**, un polímero de glucosa ramificado que supone tres cuartos de los polímeros en un gránulo de almidón, en el cual las glucosas están unidas por enlaces α -1,4, con ramificaciones α -1,6 cada 13-30 unidades. Los almidones con un porcentaje alto de amilopectina espesan una mezcla pero no forman un gel porque, a diferencia de la amilosa, las moléculas de amilopectina no se asocian y forman enlaces químicos (Vaclavik, 2002; Baiano et al., 2009; Pineda et al., 2010).

El almidón cumple distintas funciones en la preparación de los productos de panificación, proporciona azúcares para la fermentación, aporta una superficie para que el gluten se adhiera fuertemente, ayuda en la retención del gas formado y deja menos agua disponible durante la gelatinización; este último proceso favorece la fijación de la película del gluten para que sea más rígido e impermeable al gas, evitando el colapso de la miga durante el enfriamiento del pan. Cuando los gránulos de almidón son sometidos a tratamientos térmicos, debido a su estado nativo parcialmente cristalino, experimentan distintas transiciones de fase, llamadas gelatinización y retrogradación (Figura 3) (D'Appolonia & Morad, 1981).

Como consecuencia de la combinación de calor, humedad y tiempo durante la cocción del pan, los gránulos de almidón se hinchan y gelatinizan (Figura 3A). La **gelatinización** es quizá la transición más importante del almidón, es una transición de orden-desorden que sufre el almidón cuando es calentado en una disolución acuosa, es expuesto a un número de cambios irreversibles que provocan el hinchamiento y disrupción del gránulo con una consecuente pérdida de cristalinidad, en la cual la cantidad y distribución de agua tienen una fuerte influencia. Durante este proceso, las moléculas de almidón vibran rompiendo los puentes de hidrógeno

intermoleculares de las zonas amorfas de los gránulos, lo que provoca el hinchamiento por una absorción progresiva e irreversible de agua, disminuyendo el número y tamaño de las regiones ordenadas causando la fusión de la parte cristalina, pérdida de birrefringencia, aumento en la viscosidad y solubilidad del gránulo (Figura 3B).

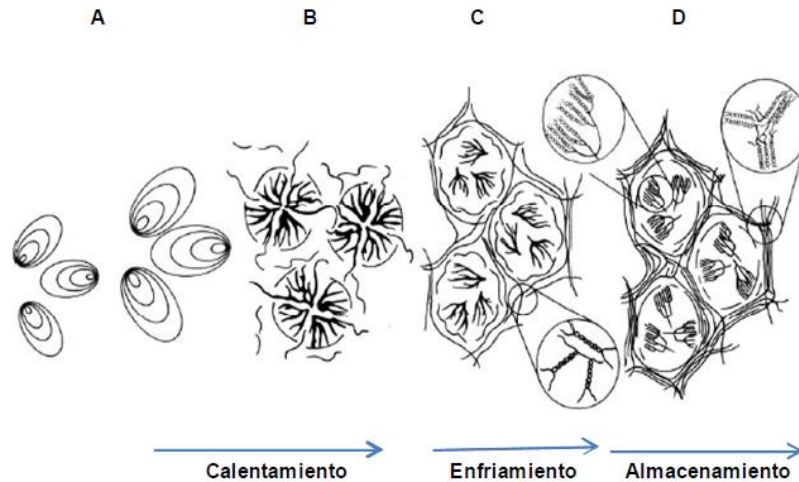


Figura 3. (A) Hinchamiento de los gránulos de almidón a medida que absorben agua. (B) Gelatinización durante el calentamiento, ruptura de los gránulos de almidón y liberación de moléculas de amilosa. (C) Retrogradación de la amilosa durante el enfriamiento, formación de la red de amilosa. (D) Retrogradación de la amilopectina durante el almacenamiento, ordenamiento de las moléculas de amilopectina (Steffolani, 2010).

Durante el enfriamiento y el almacenamiento del pan las moléculas de almidón se reasocian dando lugar a un estado más ordenado o cristalino, proceso llamado retrogradación (Silverio et al., 1996; Rodríguez et al., 2001; Pineda et al., 2010). La estructura y firmeza del pan durante las primeras horas después del horneado están dadas por la retrogradación o gelificación de la amilosa disuelta, lo que implica la formación de dobles hélices en varios segmentos de las cadenas. La amilosa gelificada forma una red continua rodeando los gránulos de almidón hinchados y deformes (Figura 3C). La retrogradación de la amilopectina ocurre a una velocidad

mucho menor que la amilosa por lo que se postula como uno de los fenómenos responsables del envejecimiento del pan durante su almacenamiento. La **retrogradación** es considerada un proceso de recristalización que ocasiona una textura firme y seca, indeseable en los alimentos a base de almidón. El desarrollo de la dureza de la miga con el tiempo es un fenómeno en el que influyen diversos factores como la pérdida de humedad de la miga junto con la recristalización de la amilopectina (Figura 3D) (Silverio et al., 1996, Steffolani, 2010).

2.4 DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL PAN

Los factores que pueden influir en la vida de anaquel de un producto pueden agruparse en intrínsecos y extrínsecos. Los primeros son proporcionados por las propiedades del producto final y dependen de variables tales como la materia prima, la formulación y la estructura del producto. Entre estos factores se encuentran: actividad de agua, nutrientes, bioquímica natural del producto, uso de conservadores en la formulación del producto, entre otros. Los extrínsecos son aquellos a los cuales se enfrenta el producto durante el período de almacenamiento como la temperatura de manejo tanto de la materia prima como de almacenamiento, humedad relativa durante el almacenamiento, exposición a la luz, carga microbiana del ambiente, composición de la atmósfera dentro del empaque, principalmente (Álvarez y Vallejos, 2001; Scanlon y Zghal, 2001).

Una práctica común empleada para evaluar la vida de anaquel de un cierto producto, es determinar los cambios que ocurren sobre sus características de calidad durante un período de tiempo. Estudios recientes han demostrado una relación entre ensayos mecánicos de alimentos, llamado Análisis del Perfil de Textura (TPA), y la textura de los alimentos (Scanlon y Zghal, 2001).

2.4.1 TEXTURA

La textura es uno de los atributos de calidad más apreciado por el consumidor. Para evaluar la textura en los alimentos, se utiliza el método de “Análisis de Perfil de Textura” (TPA), el cual imita el proceso de masticación midiendo parámetros como

dureza (N), elasticidad (mm), cohesividad (adimensional), masticabilidad (J) y gomosidad (N) (Hleap & Velasco, 2010).

En la Figura 4 se aprecia la gráfica general del perfil de textura, la cual se basa en la imitación de la masticación por medio de un texturómetro, el cual realiza una doble compresión y al graficar la fuerza contra el tiempo lleva a la extracción de siete parámetros texturales medibles:

- **Fracturabilidad:** Es la primera caída significativa de la curva durante el primer ciclo de compresión, producto de un alto grado de dureza y bajo grado de cohesividad. Se refiere a la dureza con la cual el alimento se desmorona, cruje o revienta. Se expresa en unidades de fuerza, (N).
- **Dureza:** Fuerza máxima que tiene lugar en cualquier tiempo durante el primer ciclo de compresión. Se refiere a la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar. Se expresa en unidades de fuerza, (N).
- **Cohesividad:** Cociente entre el área positiva bajo la curva de fuerza de la segunda compresión (Área 2) y el área bajo la curva de la primera compresión (Área 1). Representa la fuerza con la que están unidas las partículas, límite hasta el cual se puede deformar antes de romperse. Es adimensional.
- **Adhesividad:** Siguiendo al primer ciclo de compresión se elimina la fuerza cuando la punta de prueba se mueve a su posición original. Si el material es pegajoso o adhesivo, la fuerza se hace negativa. El área de esta fuerza negativa (Área 3), se toma como una medida de la adhesividad de la muestra. Representa el trabajo necesario para despegar el plato de compresión de la muestra o el trabajo necesario para despegar el alimento de una superficie, e.g. paladar. Se mide en ($\text{kg m}^2\text{s}^{-2}$ o $\text{N}\cdot\text{m}$).
- **Elasticidad:** Es la altura que recupera el alimento durante el tiempo que recorre entre el primer ciclo y el segundo (D_2/D_1). Mide cuánta estructura original del alimento se ha roto por la compresión inicial.

- Gomosidad: Es la energía requerida para desintegrar un alimento semisólido de modo que esté listo para ser tragado. Producto de la dureza por la cohesividad. Se expresa en (J).
- Masticabilidad: El producto de la dureza por la cohesividad y la elasticidad. Representa el trabajo necesario para desintegrar un alimento hasta que esté listo para ser deglutido. Se expresa en (N) (Hleap & Velasco, 2010; Hernández & Durán, 2012; Tournier, 2012).

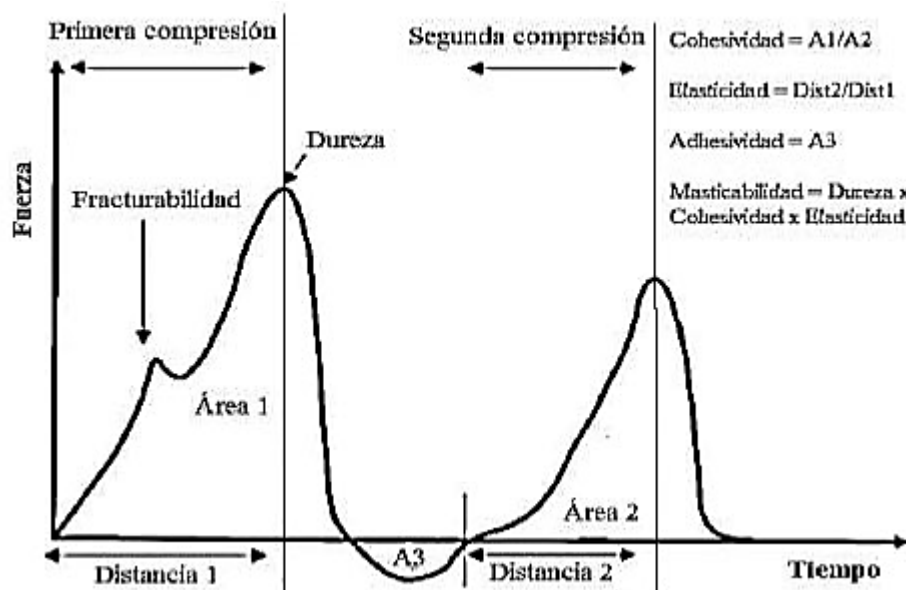


Figura 4. Gráfica general del Análisis del Perfil de Textura (TPA) (Hleap & Velasco, 2010).

2.4.2 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

La evaluación de los cambios en la microestructura de los almidones se realiza mediante distintas técnicas que tratan de estimar el orden interno de los gránulos. Entre las técnicas más usadas está la calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés), que determina la temperatura y el intervalo en el cual suceden los cambios de estado y el flujo de calor involucrado. La DSC es una técnica termoanalítica que se usa para seguir los cambios en la energía térmica asociados con las transformaciones físicas y químicas de los materiales en función de la temperatura. Por ejemplo, transiciones de una estructura cristalina a una estructura amorfa en un sólido, reacciones químicas, y otras. En ambas transformaciones se

libera o se absorbe energía térmica, i.e. calor. En los alimentos, existen numerosos ejemplos en los cuales algunas sustancias experimentan cambios físicos o químicos cuando se les suministra o extrae calor, como cambios de fase en agua, grasas, desnaturalización de proteínas y gelatinización de almidones (Rodríguez et al., 2001). Los termogramas obtenidos del almidón por la técnica de DSC permiten identificar las transiciones de fase del sistema, en el cual existe un equilibrio termodinámico entre la fase líquida y el polímero cristalino, y la temperatura a la cual las dos fases coexisten denominada temperatura de fusión, la cual depende de la composición de la fase líquida (Rodríguez et al., 2001; Montoya et al., 2012).

2.5 XANTANA

Los hidrocoloides son aditivos extensamente usados en la industria de alimentos ya que son capaces de controlar las propiedades reológicas y de textura de los sistemas acuosos; por ejemplo, estabilización de emulsiones, suspensiones y espumas (Shittu et al., 2009; Simsek, 2009). En los productos de panadería, los hidrocoloides reducen la actividad de agua debido a que compiten por el agua con la fracción de proteína y almidón en el producto, son capaces de modificar la gelatinización del almidón, extender la calidad de los productos durante el almacenamiento y comúnmente son utilizados como sustitutos para panes libres de almidón (Mohammadi et al., 2014). La xantana es uno de los hidrocoloides más utilizados en la industria de alimentos. Es un polisacárido extracelular producido por la bacteria *Xanthomonas campestris*, que posteriormente se purifica y recupera con alcohol, se seca y se muele.

La xantana es completamente soluble en agua caliente o fría, se hidrata rápidamente una vez dispersa y facilita la retención de agua produciendo disoluciones altamente viscosas a baja concentración (Matuda et al., 2008). Además, sus disoluciones proporcionan viscosidades uniformes en intervalos de temperatura desde la congelación hasta cerca del punto de ebullición, con una estabilidad térmica excelente, la estabilidad bajo condiciones ácidas o alcalinas, en presencia de sales y su resistencia a enzimas la ha convertido en uno de los principales polímeros industriales y alimenticios (Sharma & Narres, 2011).

2.5.1 ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA XANTANA

La xantana tiene un peso molecular alto, 1-2 millones Da, está compuesta por unidades repetidas de pentasacáridos que consisten en dos unidades de D-glucopiranosilo, dos unidades de D-manopiranosilo y ácido D-glucopiranosilurónico (Figura 5) (Selomulyo & Zhou, 2007; Simsek, 2009). La estructura del polímero está conformada de unidades de (1→4) β-D-glucopiranosilo, idénticos a los de la celulosa. Para alternar unidades de D-glucosilo en la posición O-3, se agrega una cadena de trisacáridos que contiene una unidad de D-glucuronosilo entre dos unidades de D-manosilo. La unidad terminal β-D-manopiranosilo esta glicosídicamente enlazada en la posición O-4 a la unidad del ácido glucopiranosilurónico, el cual a su vez está glicosídicamente enlazado en la posición O-2 de la unidad α-D-manopiranosilo. Aproximadamente la mitad de las unidades terminales de D-manosilo contienen ácido pirúvico como una acetal 4,6-cíclico. Finalmente, la unidad D-manosilo no terminal está estequiométricamente sustituida en la posición O-6 con un grupo acetilo (Selomulyo & Zhou, 2007; Sharma & Narres, 2011).

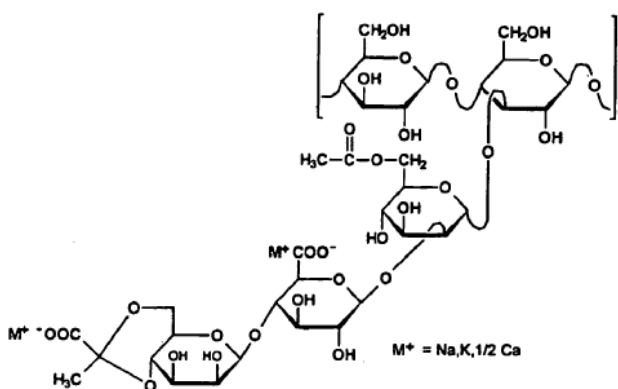


Figura 5. Unidad repetitiva de la xantana.

2.5.2 PROPIEDADES

- La xantana es un polvo de color blanco o amarillo pálido.
- Alta viscosidad y solubilidad en agua fría y caliente.

- Comportamiento de adelgazamiento a la cizalla (shear-thinning) lo cual mejora las cualidades sensoriales en el producto final y garantiza un alto grado de mezclado, bombeado y vertido.
- Resistente a variaciones de pH, muy estable en condiciones alcalinas y ácidas (pH 2-12). A pH de 9 o mayor, la xantana se diacetila gradualmente, pero esto tiene poco efecto sobre las propiedades de la disolución.
- La viscosidad de la disolución es casi independiente a la temperatura ya que no se ve afectada desde el punto de congelación hasta el punto de ebullición del agua pura.
- Buena compatibilidad. La xantana puede formar un sistema de espesamiento estable combinándola con ácido, álcali, sal, enzimas y entre otros materiales químicos.
- Es resistente a la degradación enzimática como la proteasa, celulasa, hemicelulasa, amilasa y pectinasa. Sin embargo, la xantana es completamente biodegradable, está sujeta a la depolimerización por enzimas formadas por ciertos microorganismos bajo ciertas condiciones ambientales. En presencia de otras gomas, la xantana se degrada con agentes oxidantes fuertes como los peróxidos y los persulfatos.
- Los efectos de los electrolitos en disoluciones con xantana son dependientes de la concentración del hidrocoloide. Para una concentración inferior a 0.15%, al añadir un electrolito (NaCl) se reduce ligeramente la viscosidad, mientras que para concentraciones mayores, el electrolito tiene el efecto opuesto (Gremount International, 2014).

2.5.3 APLICACIONES EN ALIMENTOS

- Productos de panificación: En la industria de panificación, la xantana se usa para aumentar la retención de agua durante el horneado y el almacenamiento para extender la vida de anaquel de productos y masas refrigeradas (Sharma & Narres, 2011). Se utiliza en conjunto con emulsionantes en la preparación de pan libre de gluten, panes con altos porcentajes de proteína, jarabes y rellenos de pasteles, toppings y postres. Además la xantana se utiliza para

proveer estabilidad y mejorar la masa durante el proofing, ha mostrado retrasar el envejecimiento del pan, aumentando la retención de humedad, inhibiendo la retrogradación, extendiendo así su vida de anaquel (Simsek, 2009).

- Bebidas: Se usa para dar cuerpo a las bebidas y jugos, mantiene la suspensión cuando las bebidas contienen partículas de pulpa de fruta.
- Lácteos: Las mezclas de xantana con otras gomas como CMC, algarrobo o guar, pueden ser estabilizantes efectivos para helados, sorbetes, leches, raspados, yogurts, queso crema, y otros.
- Aderezos, salsas, jarabes, coberturas y condimentos: La xantana proporciona estabilidad a emulsiones por periodos de hasta 1 año, facilita el flujo en la botella, les da consistencia y apariencia densa (Sharma & Narres, 2011).

2.5.4 ESTUDIOS PREVIOS DE ADICIÓN DE HIDROCOLOIDES AL PAN

Existen varios estudios que muestran el uso potencial de diferentes hidrocoloides en la industria de la panificación. En ellos se reportan los cambios en las propiedades reológicas y mecánicas de los productos a los cuales se les han añadido estos aditivos. En esta sección se comentan algunos casos, en los cuales a pesar de que la formulación es diferente a la usada en este estudio, las conclusiones emitidas ayudan a entender el comportamiento de los resultados reportados en esta tesis.

Guarda et al. (2004) estudiaron el efecto de diferentes hidrocoloides como agentes de antienvjecimiento. El pan fue preparado con harina de trigo, 2% de levadura, 2% de sal y agua. La masa se fermentó a 30 °C por 30 min y se horneó a 200 °C por 12 minutos. El pan se almacenó a 25 °C por 24 horas. Se analizó el efecto de la adición de alginato, κ -carragenina, hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y xantana en una concentración de 0.1 y 0.5%. Se midió la humedad (%), dureza, volumen y relación entre la altura y el ancho del pan fresco y después de 24 horas de almacenamiento. Los panes a los que se les agregó HPMC tuvieron el mayor volumen debido a que aumentó la retención de gas durante la fermentación, mientras que la κ -carragenina y la xantana produjeron panes con mayor altura. La humedad (%) fue mayor para los

panes a los que se les adicionó 0.5% de hidrocoloide, y no se observaron diferencias entre los diferentes hidrocoloides. El pan con mayor dureza fue aquel preparado con xantana debido a la formación de una miga compacta. El pan de menor dureza fue el preparado con HPMC; este hidrocoloide fue el mejor agente de antienviejecimiento y una concentración de 0.1% fue suficiente para tener un efecto visible.

Selomulyo & Zhou (2007), resumieron y compararon el uso de diferentes hidrocoloides en las características finales del pan de trigo. La goma guar aumentó el volumen específico con concentraciones de 1.5%, y también hizo que la estructura de la miga fuese más abierta. La xantana proporcionó una mejor retención de la estructura del gluten, y la mayor retención de humedad se observó para concentraciones de 0.5%. También redujo el diámetro del pan cuando se usó en concentraciones mayores de 0.16%. El HPMC aumentó el contenido de humedad y produjo una miga más suave, retardó el proceso de envejecimiento cuando se usó en concentraciones de 0.3%. La κ -carragenina aumentó el contenido de humedad con concentraciones de 0.5% pero no se observaron efectos sobre el envejecimiento.

Shittu et al. (2009), estudiaron el efecto de la xantana sobre pan hecho a base de yuca y trigo. Los ingredientes utilizados fueron harina de trigo, azúcar, sal, margarina, levadura, harina de yuca y xantana en concentraciones de 0 a 2%. La masa se horneó a 200 °C por 20 minutos. Se analizó el tamaño, la suavidad, la apariencia y el contenido de humedad en pan fresco y después de 96 horas de almacenamiento. Los resultados mostraron que los panes a los que se les añadió 1% de xantana tuvieron mayor humedad y por lo tanto mayor suavidad que aquellos con 2% y el control. Asimismo, presentaron una estructura más abierta. El efecto de suavidad se atribuye a la presencia de xantana ya que impide las interacciones entre el gluten y el almidón favoreciendo a que se retarde el envejecimiento. Una concentración de 1% de xantana fue suficiente para reducir la pérdida de humedad y la firmeza del pan hecho a base de yuca y trigo.

Mohammadi et al. (2014), prepararon panes libres de gluten en los cuales se estudió el efecto de la xantana y la carboximetilcelulosa (CMC). Ellos usaron almidón de maíz, harina de soya, huevo, azúcar, sal, aceite vegetal, levadura, CMC y xantana en concentraciones de 0.5, 1.0 y 1.5%; la masa fue horneada a 260 °C por 14 minutos.

Se hicieron pruebas de humedad, dureza y apariencia, en pan fresco y después de 72 horas de almacenamiento. El pan elaborado con 1.0% de hidrocoloide mostró mayor humedad debido a la retención de agua y después de 72 horas el pan elaborado con 1.5% de xantana mostró la mayor humedad y la menor dureza. La adición de CMC no mostró cambios significativos en la dureza después de 72 horas. El pan preparado con xantana tuvo una miga más compacta, mientras que el pan preparado con CMC mostró celdas de gas más grandes. En conclusión, la xantana fue el mejor hidrocoloide para producir panes libres de gluten.

3. OBJETIVOS

- Determinar el cambio en las propiedades mecánicas de pan integral durante su almacenamiento para conocer cuáles de ellas son más sensibles al envejecimiento de este alimento.
- Evaluar las propiedades que aporta la xantana a las características iniciales y finales del pan integral, fermentando la masa a diferentes temperaturas con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y retardar el envejecimiento.
- Encontrar la concentración adecuada de xantana y la temperatura de fermentación que permitan alargar la vida de anaquel de este producto.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES

Se utilizó harina de trigo integral marca “Tres estrellas”, con fibra natural que fue adquirida en el comercio local. En la Tabla 4 se presentan las características de la harina reportadas en la etiqueta.

Tabla 4. Características de la harina de trigo integral comercial utilizada en los ensayos.

Tamaño de la porción	100 g
Contenido energético	1506.21 kJ (335.87 kcal)
Proteínas	12.28 g
Grasas	4.99 g
Hidratos de carbono	65.46 g
Azúcares	9.06 g
Sodio	0.00 mg
Fibra dietética	6.26 g
Colesterol	0.00 mg

Se utilizó harina de trigo refinada (“La Espiga”, México) que fue adquirida en el comercio local. En la Tabla 5 se presentan las características de la harina reportadas en la etiqueta.

Tabla 5. Características de la harina de trigo integral comercial utilizada en los ensayos.

Tamaño de la porción	100 g
Contenido energético	1448 kJ
Proteínas	10.5 g
Grasas	1.6 g
Hidratos de carbono	70.33 g
Sodio	3 mg
Fibra dietética	1.5 g

Se utilizó levadura comercial seca instantánea (*Saccharomyces cerevisiae*) (“Saf-istant”) que se adquirió en el comercio local.

4.2 ELABORACIÓN DE PAN

La formulación estándar se muestra en la Tabla 6 (Forkish, 2012):

Tabla 6. Formulación usada para preparar el pan.

INGREDIENTE	CONCENTRACIÓN (%)
Harina Integral	41.11
Harina Blanca	13.70
Agua	43.85
Sal	1.17
Levadura	0.17

En la Figura 6 se muestran las etapas seguidas para preparar el pan integral artesanal (Forkish, 2012)

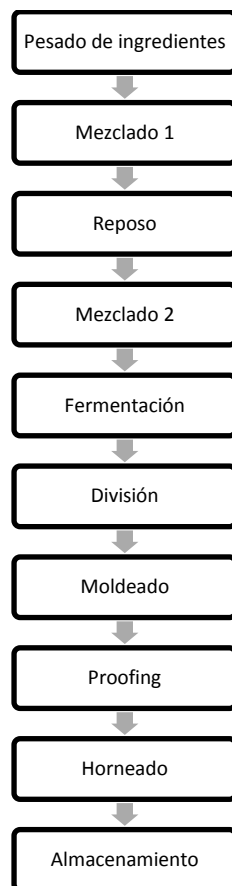


Figura 6. Diagrama general de preparación de pan integral (Forkish, 2012)

1) Pesado de ingredientes

La Tabla 7 muestra las cantidades de los diferentes ingredientes usados en las formulaciones para preparar el pan.

Tabla 7. Masa de ingredientes en las diferentes formulaciones usadas en este trabajo para preparar pan.

INGREDIENTE	0% XANTANA	0.1% XANTANA	0.5% XANTANA
Harina de trigo integral	562.5 g	562.5 g	562.5 g
Harina de trigo blanca	187.5 g	186.1 g	180.5 g
Agua	600 g	600 g	600 g
Sal	16 g	16 g	16 g
Levadura	2.25 g	2.25 g	2.25 g
Xantana	0 g	1.4 g	7 g
TOTAL	1368.25 g	1368.25 g	1368.25 g

2) Mezclado 1

Se mezclaron las harinas integral, blanca y xantana con agua (50 °C), en un recipiente de vidrio, tomando desde el fondo del recipiente todos los ingredientes hasta que se incorporaron completamente y amasando hasta que se obtuvo una masa homogénea.

3) Reposo

La boca del recipiente en el que se mezclaron los ingredientes se cubrió con plástico adherente “Chinet” y se dejó reposar 20 min a temperatura ambiente.

4) Mezclado 2

A la masa ya formada en las etapas previas se le agregó sal, espolvoreándola sobre su superficie. La levadura se agregó en el centro de la masa. Estos dos ingredientes se incorporaron amasando con las manos húmedas. Para ello la masa se tomó desde el fondo, se estiró suavemente y se dobló hacia la superficie. Esta operación se repitió tres veces con el resto de la masa hasta la completa incorporación de la sal y la levadura. Para incorporar completamente los ingredientes se usó el “método de

pinza” durante 2 a 6 min. El método consiste en usar el dedo pulgar y el índice, haciendo 4 o 5 cortes en toda la masa, y doblándola. El procedimiento se repitió de manera alternada cortando y doblando hasta la incorporación completa de los ingredientes y el desarrollo de cierta tensión en la masa.

5) Fermentación

La fermentación se inició a 30 o 40° C según el caso. Durante la fermentación la masa se manipuló como se describe a continuación:

5.1) Primer doblez: Esta masa necesitó tres dobleces suaves. El primer doblez se hizo 10 minutos después de mezclar todos los ingredientes.

5.2) Segundo doblez: El segundo doblez se hizo 1 hora después del primero.

5.3) Tercer doblez: El tercer doblez se hizo 30 minutos después del segundo.

La masa se dejó reposar 3 horas después del mezclado 1. Cuando la masa tuvo el triple de su volumen original se consideró lista para ser dividida.

6) División

La masa se dividió en diez porciones. Para ello se espolvoreó un poco de harina sobre la superficie de la mesa de trabajo y las manos para evitar que la masa se pegase. Se espolvorearon las paredes del recipiente para sacar la masa y colocarla sobre la superficie de trabajo. Se espolvoreó harina sobre la zona donde se hicieron los cortes.

7) Modelado

La masa se “boleó” estirando suavemente desde el fondo de la masa hasta la superficie. Se repitió esta operación con la masa restante hasta formar la “bola”.

8) Proofing

Las porciones se colocaron sobre una superficie, con la unión de los dobleces hacia abajo. Posteriormente se cubrieron con una película plástica y se dejaron reposar 1 hora a temperatura ambiente. En esta etapa, el horno se precalentó a 200 °C.

9) Horneado

Las porciones de masa fueron horneadas a 200 °C por 40 minutos. Se usó un horno eléctrico (EKA KF620, Italia)

10) Almacenamiento

Concluido el horneado, el pan se dejó reposar 20 minutos antes de almacenarlo. Cada hogaza se guardó individualmente en una bolsa de plástico “BolRol” con cierre hermético y se almacenó en refrigeración, 8.5 °C (temperatura del refrigerador) 26% humedad relativa, bien identificada con la fecha de elaboración, la concentración de xantana y la temperatura de fermentación.

4.3 EVALUACIÓN DEL PAN

Para evaluar el pan, se hicieron pruebas de: estructura de la miga, textura, dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y gomosidad, humedad y DSC.

4.3.1 ESTRUCTURA DE LA MIGA

La estructura de la miga, se evaluó a través de un análisis de imágenes. De la imagen entera, se seleccionó manualmente, de la parte central, un área de igual tamaño en todos los panes, se editó el formato de la fotografía para crear una imagen binaria, donde los píxeles en color negro representan los alveolos de gas y los píxeles en color blanco se consideran miga de pan (Figura 7) (Steffolani, 2010).

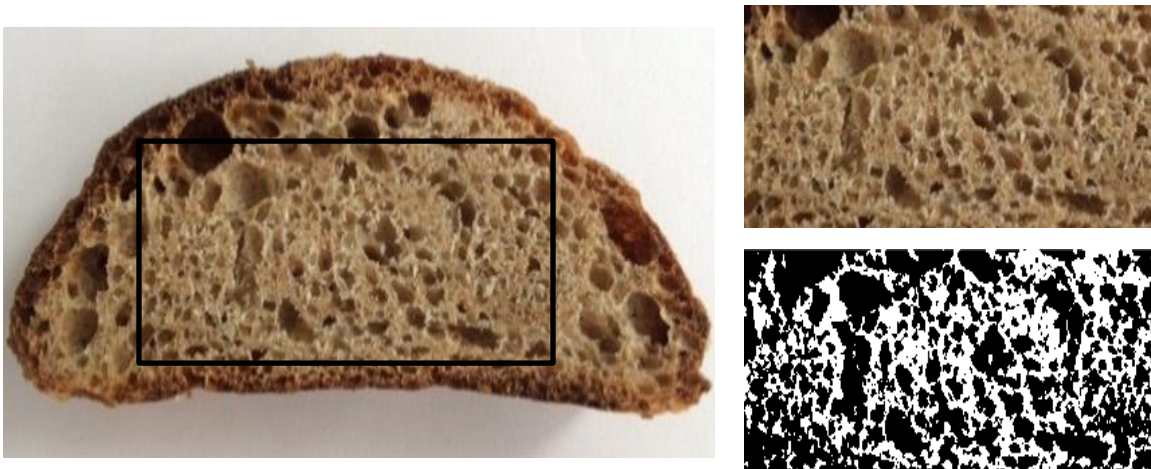


Figura 7. Fotografía de una rebanada de pan, mostrando el área seleccionada (5 x 2.5 cm aproximadamente). A su lado el área seleccionada transformada en imagen binaria. Todos los pixeles en blanco corresponden a la miga de pan y en negro a los alveolos de gas.

4.3.2 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

La humedad se determinó según la Norma Mexicana para la determinación de humedad en productos alimenticios (NMX-F-083-1968). Se pesó aproximadamente 5 g de muestra en un pesafiltro con tapa, previamente llevado a peso constante 2 horas a 100-130 °C. La muestra se secó en un horno (HCF-45, México) durante 3 horas a 130 °C hasta peso constante, los pesafiltros se transfirieron a un desecador hasta equilibrar la temperatura. Se pesó y se calculó la humedad con la siguiente ecuación:

$$\%HUMEDAD = \frac{W1 - W2}{W} \times 100$$

Donde

W1: Peso del recipiente con muestra húmeda (g).

W2: Peso del recipiente con muestra seca (g).

W: Peso de la muestra (g).

Las mediciones se realizaron por triplicado a los 1, 3, 5, 8 y 10 días de almacenamiento.

4.3.3 DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA

Para el Análisis de Perfil de Textura se cortaron 4 cubos de miga de la parte central del pan de aproximadamente 2.5 cm x 2.5 cm. Las pruebas se realizaron usando una máquina de pruebas mecánicas (Sintech 1/S, MTS, EE.UU.) equipada con el software Test Works 3.03, con el módulo de cálculo de TPA y una celda de carga de 100 N. Las muestras se colocaron sobre una placa inferior y se comprimieron con una sonda cilíndrica de aluminio de 2.5 cm de diámetro. La velocidad de compresión fue de 60 mm/min. El ensayo consistió en dos rampas de compresión sucesivas hasta una deformación de 50% en relación con la altura original de la muestra. Las mediciones se realizaron a los 1, 3, 5, 8 y 10 días de almacenamiento.

4.3.4 CALORIMETRÍA DE BARRIDO DIFERENCIAL

Para esta prueba se utilizó un calorímetro diferencial de barrido, (μ DSC 7 EVO, Setaram, Francia). Se utilizó una atmósfera de nitrógeno. Se realizaron rampas estándar para un intervalo de 25 hasta 90 °C, con una velocidad de 1.2 °C/min. Las muestras fueron colocadas en celdas de Hastelloy, con una masa de aproximadamente 750 mg de una mezcla previamente preparada de miga de pan y agua en proporción 1:2, respectivamente. Se utilizó una celda con agua desionizada como referencia. A partir de los termogramas obtenidos se determinaron la temperatura pico (T_p) y la entalpía de gelatinización (ΔH). Las mediciones se realizaron por duplicado al segundo y al décimo día de almacenamiento.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados se hizo mediante un Diseño de Experimentos de dos factores con interacción. Todos los ensayos fueron realizados por duplicado y se calculó el promedio. Los resultados obtenidos fueron evaluados estadísticamente mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) para saber si existió diferencia significativa a un nivel de confianza de 0.05% en los tratamientos. En el caso de presentar diferencias, la comparación de las medias se realizó mediante un análisis de Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un nivel de significancia de 0.05. Mediante este diseño se estudió el efecto de la adición de xantana con tres niveles

de variación, y la temperatura de fermentación con dos niveles de variación, en los días 1 y 10 de almacenamiento, excepto para la calorimetría que se analizó los días 2 y 10.

Factores:

- Temperatura de fermentación: 30 y 40°C.
- Concentración de xantana: 0% (control), 0.1 y 0.5%.

Variables de respuesta:

- Textura: Dureza en los días 1 y 10.
- Humedad: Días 1 y 10.
- : Entalpía de gelatinización: Días 2 y 10.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ESTRUCTURA DE LA MIGA

El análisis de imagen se ha revelado como una técnica muy útil e importante para observar las características de los productos horneados y el impacto de su calidad (Shittu et al., 2009). En la primera etapa se obtuvo una imagen en tonalidades grises de las diferentes muestras de pan. La típica imagen gris donde se muestra el impacto de la adición de xantana en el pan se muestra en la Figura 8. Con base en la apariencia general de los panes, la adición de xantana produjo panes de menor diámetro y mayor altura comparados con el control, para ambas temperaturas de fermentación de la masa. Este resultado coincide con lo reportado por Mandala (2005), quien observó que el diámetro del pan se reduce cuando se usa xantana en concentraciones superiores a 0.16% debido a que el hidrocoloide hace que la masa sea demasiado rígida para que se incorporen los gases. El pan con 0.1% de xantana tiene una miga con poros más grandes, mientras que el pan con 0.5% de xantana tiene una miga más compacta, pero sigue teniendo mayor altura que el pan sin xantana.

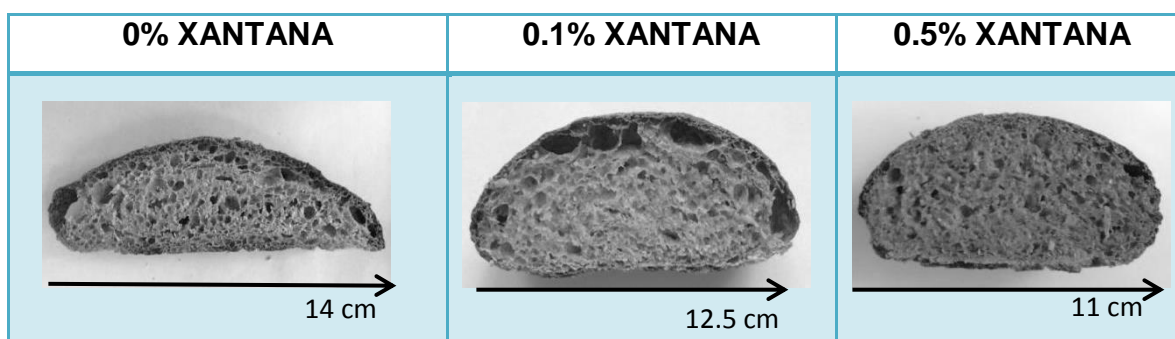


Figura 8. Apariencia general del pan en escala de grises.

Algunos conocimientos sobre la estructura que define la apariencia de la miga de pan permiten predecir los atributos de calidad del pan. A nivel macroscópico en la miga de pan se pueden distinguir dos fases, una gaseosa que es el aire, y una sólida que son las paredes de las celdas de aire. Al ver una muestra representativa de la miga de pan, se observa claramente que la fase sólida está totalmente conectada; y a simple vista las celdas de aire parecen aisladas. La fracción del volumen de las fases

sólida y gaseosa, y la naturaleza de su conectividad, determinan las propiedades mecánicas del pan (Scanlon & Zghal, 2001).

Al comparar todas las estructuras de las migas de los panes obtenidos (Tablas 8 y 9), se observó que la adición de xantana causó que la miga fuera más homogénea con muchos alveolos pequeños distribuidos de manera uniforme, cuya cantidad aumentó con la concentración de xantana. Por otro lado, la estructura de los panes que sin xantana fue más heterogénea, con alveolos de diferentes tamaños, sin una distribución uniforme por lo que la estructura de la miga estuvo más aireada. Estos resultados se correlacionan con la firmeza de la miga; los panes elaborados con 0.5% de xantana fueron los más uniformes y los que presentaron una mayor dureza.

En las imágenes obtenidas en el último día de almacenamiento, puede observarse que la cantidad de alveolos es menor con respecto al primer día. Con el paso de los días, la miga del pan se volvió seca y quebradiza, producto del envejecimiento, siendo los panes elaborados con xantana 0.5% y la masa fermentada a 40 °C los que mantuvieron la mayor cantidad de alveolos y los menos quebradizos.

Tabla 8. Imágenes de miga de pan obtenidas el primer y último día de almacenamiento, sin y con xantana, con la masa fermentada a 40 °C.


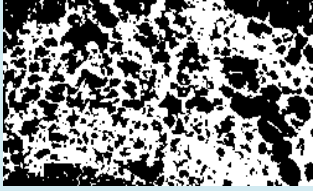
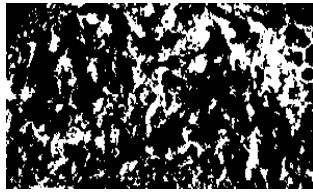
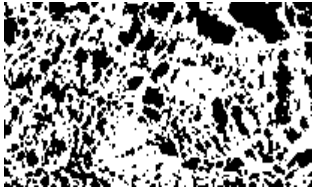
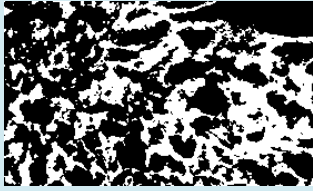
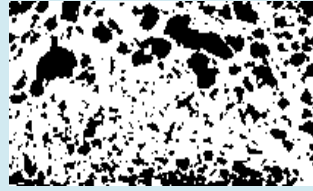
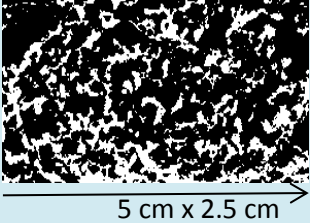

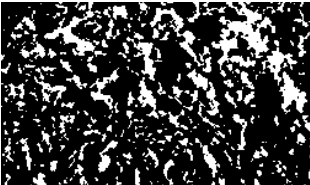
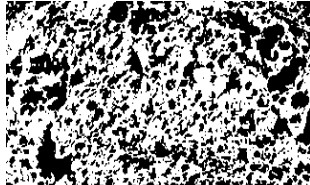
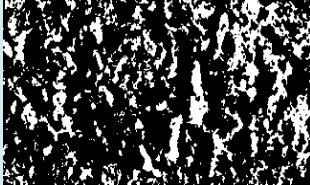
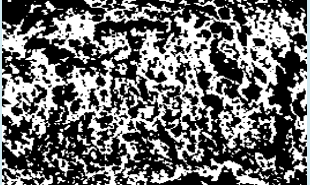
% XANTANA	DÍA 1	DÍA 10
0%	 <p data-bbox="667 667 829 699">5 cm x 2.5 cm</p>	
0.1%		
0.5%		

Tabla 9. Imágenes de miga de pan obtenidas el primer y último día de almacenamiento, sin y con xantana, con la masa fermentada a 30 °C.

% XANTANA	DÍA 1	DÍA 10
0%		
0.1%		
0.5%		

5.2 HUMEDAD

El contenido de humedad es uno de los atributos de calidad más significativos en el almacenamiento del pan (Novotni, 2011). En la Tabla 10 se muestra el contenido de humedad de las diferentes formulaciones de pan recién elaborado y de pan al décimo día de almacenamiento. La humedad de los panes recién elaborados, fue ligeramente mayor (1.03% para los panes fermentados a 40°C y 2.39% para los fermentados a 30°C) en aquellos con xantana; los de mayor humedad fueron los

panes elaborados con 0.5% de polisacárido. Sin embargo, estadísticamente no existió diferencia significativa ($p < 0.05$) al adicionar la xantana y la temperatura de fermentación de la masa comparadas con los controles sin xantana. Se considera que el incremento en el contenido de humedad de la miga es debido a la capacidad de unión de agua de los hidrocoloides, el cual disminuye la degradación de la miga durante el almacenamiento (Mohammadi et al., 2014).

Tabla 10. Contenido de humedad de los panes con las diferentes formulaciones y condiciones de fermentación de la masa.

PAN		HUMEDAD (%)	
Temperatura de fermentación (°C)	Concentración de xantana (%)	Día 1	Día 10
40	0.0	47.97 ^a	33.84 ^a
	0.1	48.13 ^a	38.92 ^b
	0.5	49.00 ^a	40.06 ^b
30	0.0	47.36 ^a	37.66 ^a
	0.1	49.07 ^a	37.89 ^b
	0.5	49.76 ^a	38.91 ^b

Subíndices iguales en una misma columna indican que no hay diferencia significativa ($p < 0.05$).

Los hidrocoloides son usados en los productos de panadería para controlar la absorción de agua y por consiguiente la vida de anaquel del producto. El efecto que tuvo la adición de xantana sobre el pan durante el almacenamiento fue el de conservar la humedad por encima de la humedad final de los panes control independientemente de la temperatura de fermentación de la masa. En las Figuras 9 y 10 se muestra el cambio de la humedad de los panes con el tiempo de almacenamiento. En todos los casos se observaron dos zonas de variación; la primera del primero al quinto día, y la segunda del quinto al décimo día de almacenamiento. En ambas zonas la humedad disminuyó con el tiempo de manera lineal, pero no con la misma tasa de disminución de humedad con el tiempo, $-dH/dt$.

En la primera zona, $-dH/dt$ fue notablemente mayor que en la segunda como se ilustra en la Tabla 11. La mayor tasa de pérdida de humedad con el tiempo de almacenamiento correspondió al pan sin xantana con la masa fermentada a 40 °C, seguido por el pan sin xantana con la masa fermentada a 30 °C, ambos entre el primero y el quinto día, es decir, en la primera zona. En la segunda zona no hubo prácticamente pérdida de humedad en los panes sin xantana según se observa en las Figuras 9 y 10 y la Tabla 11. La adición de xantana disminuyó la tasa de pérdida de humedad en la primera zona para ambas temperaturas. En la Tabla 11 se observa cómo la adición de 0.5% de xantana resultó en la tasa más pequeña de pérdida de humedad en la primera zona para la masa fermentada a 40 °C. Entonces, el efecto de la xantana sobre la disminución de la tasa de pérdida de humedad con el tiempo de almacenamiento es evidente y es gradual a diferencia de las formulaciones sin xantana que tienen una disminución más rápida al inicio y después alcanzan un valor prácticamente constante. Estadísticamente, existe una diferencia significativa en la humedad de los panes al décimo día para aquellos elaborados con 0.1 y 0.5% de xantana en comparación con el control sin xantana, mientras que los panes con 0.1 y 0.5% no muestran diferencia significativa ($p < 0.05$), debido a la adición de xantana.

Lo anterior pone en evidencia que el uso de hidrocoloides como la xantana en la elaboración de pan, tiene un efecto positivo sobre el contenido de humedad durante el almacenamiento en relación con pan sin el hidrocoloide. En diferentes estudios (Guarda et al., 2004; Shittu et al., 2009 y Mohammadi et al., 2014), el contenido de humedad de panes con diferentes hidrocoloides fue superior al de los correspondientes controles. En general, la más baja concentración examinada fue suficiente para generar cambios favorables sin posteriores modificaciones al aumentar la concentración de cada hidrocoloide.

Desde un punto de vista cinético, se puede postular que la disminución de humedad con el tiempo de almacenamiento está descrita por una relación de orden cero según la cual

$$-\frac{dH}{dt} = k$$

Esta relación aplica en las dos zonas ya mencionadas con los valores de las respectivas constantes mostrados en la Tabla 11. Se examinaron otras ecuaciones, i.e. decremento exponencial, en un intento de describir la disminución de humedad sobre todo el intervalo de tiempo de almacenamiento con una función única. Sin embargo, los coeficientes de regresión fueron notablemente menores que en el caso de la ecuación para la cinética de orden cero. Por ello, se decidió conservar este modelo a pesar de que la disminución de humedad se dividió en dos zonas con su respectiva constante. No obstante, este análisis permite ver con claridad el efecto de la xantana.

Tabla 11. Tasas de disminución de humedad con el tiempo de almacenamiento y coeficientes de regresión lineal de todas las formulaciones de pan.

40 °C; 0% xantana			30 °C; 0% xantana		
Zona	-dH/dt (%/d)	r²	Zona	-dH/dt (%/d)	r²
1 a 5 días	3.438	0.9726	1 a 5 días	2.354	0.9839
5 a 10 días	0.0811	0.7809	5 a 10 días	0.07471	0.1954
40 °C; 0.1% xantana			30 °C; 0.1% xantana		
1 a 5 días	1.859	0.9953	1 a 5 días	1.974	0.9993
5 a 10 días	0.3566	0.9980	5 a 10 días	0.06542	0.9988
40 °C; 0.5% xantana			30 °C; 0.5% xantana		
1 a 5 días	1.289	0.9986	1 a 5 días	1.790	0.9986
5 a 10 días	0.7306	0.8964	5 a 10 días	0.7017	0.8411

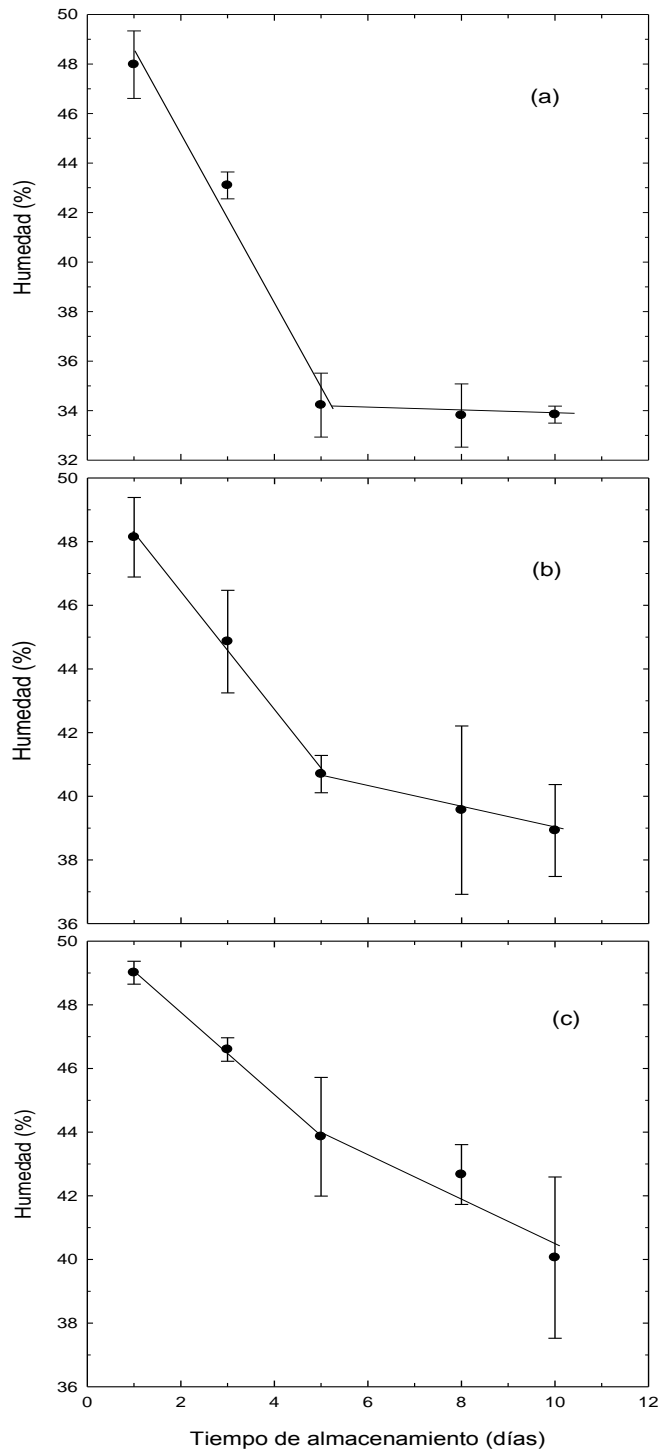


Figura 9. Cambio de la humedad con el tiempo de almacenamiento de pan sin xantana (a) y con 0.1 (b) y 0.5% (c) de xantana. La masa se fermentó a 40 °C. Las líneas son regresiones.

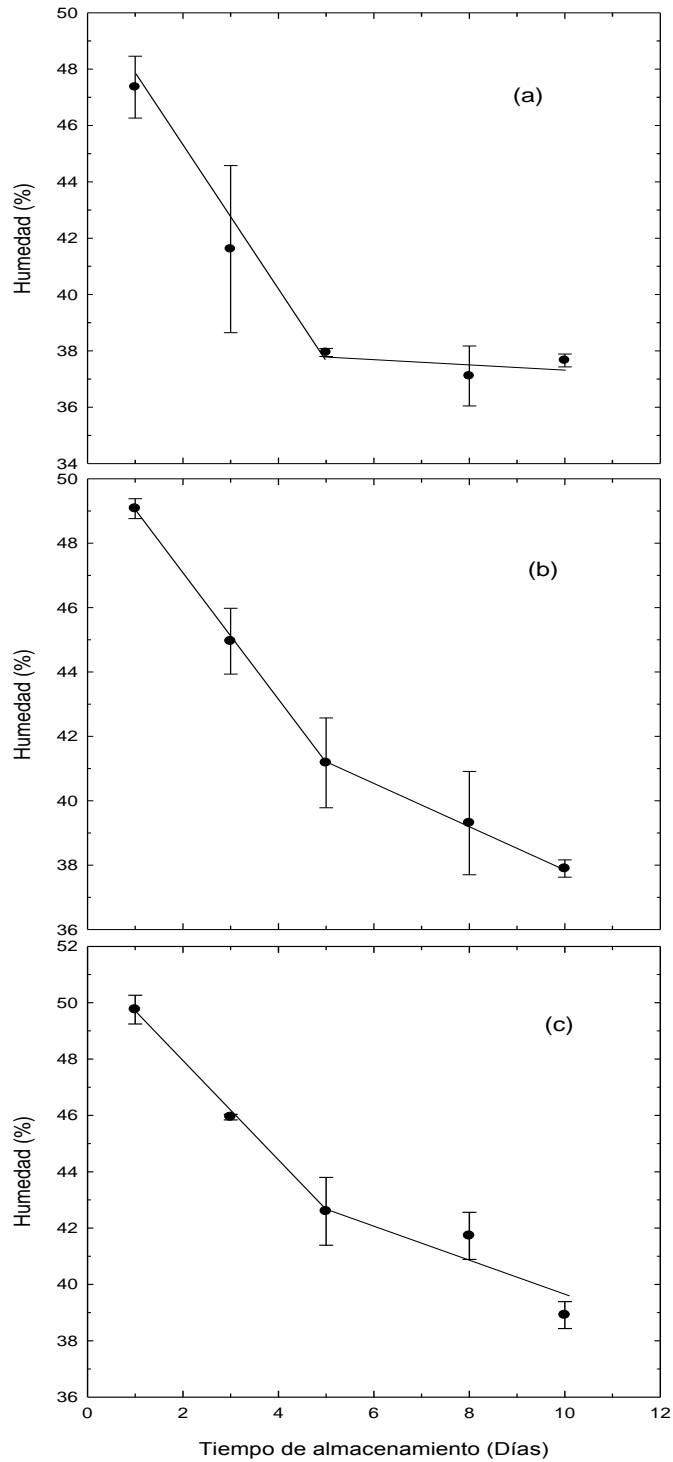


Figura 10. Cambio de la humedad con el tiempo de almacenamiento de pan sin xantana (a) y con 0.1 (b) y 0.5% (c) de xantana. La masa se fermentó a 30 °C. Las líneas son regresiones.

5.3 ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA

5.3.1 DUREZA

De todos los parámetros obtenidos del análisis de perfil de textura de la miga del pan, la dureza o firmeza es el principal atributo para estimar su calidad, quizá por la estrecha asociación que tiene con la percepción de frescura por los consumidores. Por lo general, los consumidores prefieren panes con una corteza crujiente y con una miga tierna y aireada.

La pérdida de frescura del pan durante el almacenamiento disminuye la aceptación de los consumidores. Este fenómeno se conoce como envejecimiento del pan y consta de los siguientes efectos: endurecimiento de la miga, pérdida de la nota crujiente de la corteza y deterioro de las propiedades organolépticas (Jensen et al., 2011). En la Tabla 12 se muestran los valores de dureza obtenidos el día de elaboración del pan. Los panes elaborados con 0.5% de xantana tuvieron la mayor dureza, 5.86 N, debido a que la estructura de la miga fue más compacta con alveolos de gas más pequeños, además de tener el mayor contenido de agua, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Guarda et al. (2004) donde los panes elaborados con xantana al 0.5% presentaron la mayor dureza debida a lo compacto de la miga. Por otro lado los más suaves fueron los panes elaborados con 0.1% de xantana los cuales tuvieron los alveolos de gas ligeramente más grandes.

Investigaciones recientes han propuesto que el efecto de la xantana sobre la textura del pan se debe a dos fenómenos opuestos: primero, a un incremento en la rigidez como consecuencia de la disminución del hinchamiento de los gránulos de almidón y lixiviación de la amilosa y segundo, un efecto debilitador sobre la estructura del almidón debido a la inhibición de la asociación de las cadenas de amilosa, lo cual hace que mejore la retención del agua y su distribución en el pan (Mohammadi et al., 2014).

Estadísticamente, existe una diferencia significativa ($p < 0.05$) en la dureza del pan recién elaborado para las diferentes concentraciones de xantana, 0.1 y 0.5%, pero

no hay diferencia en la dureza atribuible a la adición de este hidrocoloide con respecto al control.

Tabla 12. Dureza del pan integral durante el almacenamiento (Día 1 y 10)

PAN		DUREZA (N)	
TEMPERATURA DE FERMENTACIÓN (°C)	CONCENTRACIÓN DE XANTANA (%)	DÍA 1	DÍA 10
40	0.0	4.76 ± 0.57 ^a	29.62 ± 0.94 ^a
40	0.1	3.91 ± 0.63 ^{ab}	24.98 ± 0.23 ^a
40	0.5	5.86 ± 0.41 ^{ac}	27.55 ± 1.01 ^a
30	0.0	4.36 ± 1.45 ^a	26.02 ± 1.73 ^a
30	0.1	2.82 ± 0.15 ^{ab}	20.65 ± 2.01 ^a
30	0.5	5.45 ± 0.85 ^{ac}	28.17 ± 7.06 ^a

Superíndices diferentes en una misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

En las Figuras 11 y 12 se muestra el cambio de la dureza con el tiempo de almacenamiento. En todos los casos, de la misma manera que en el contenido de humedad, se observaron dos zonas de variación; la primera del primero al quinto día y la segunda del quinto al décimo día de almacenamiento. En ambas zonas existe un aumento lineal de la dureza de la miga de pan con el tiempo y con diferente tasa de aumento de la dureza, dD/dt . En la Tabla 13, se muestra cómo en la primera zona dD/dt es mayor que en la segunda zona. El pan sin xantana con la masa fermentada a 40 °C fue el que presentó la mayor tasa de aumento de dureza con el tiempo. En la segunda zona se observa un ligero incremento de la dureza del pan, pero las tasas de aumento en los panes con xantana, no son muy diferentes entre sí. En las Figuras 11 y 12 y la Tabla 13 se observa cómo la adición de xantana al pan disminuyó la tasa de aumento de dureza. En la segunda zona para las masas fermentadas a 40 °C existió aún aumento lineal de la dureza, mientras que en las fermentadas a 30 °C se observaron tasas de aumento de dureza iniciales muy rápidas que después alcanzaron un valor prácticamente constante.

Tabla 13. Tasas de aumento de dureza con el tiempo de almacenamiento y coeficientes de regresión lineal de todas las formulaciones de pan.

40 °C; 0% xantana			30 °C; 0% xantana		
Zona	dD/dt (%/d)	r²	Zona	dD/dt (%/d)	r²
1 a 5 días	4.2391	0.9832	1 a 5 días	4.0606	0.9436
5 a 10 días	1.6054	0.9824	5 a 10 días	1.0147	0.7409
40 °C; 0.1% xantana			30 °C; 0.1% xantana		
1 a 5 días	3.1476	0.9949	1 a 5 días	4.0780	0.9778
5 a 10 días	1.7767	0.8653	5 a 10 días	0.2391	0.1540
40 °C; 0.5% xantana			30 °C; 0.5% xantana		
1 a 5 días	3.4382	0.9802	1 a 5 días	3.8210	0.9875
5 a 10 días	1.5875	0.9999	5 a 10 días	1.4232	0.8675

Desde un punto de vista cinético, se puede postular que el aumento de la dureza con el tiempo de almacenamiento está descrita por una relación de orden cero según la cual

$$\frac{dD}{dt} = k$$

La adición de xantana tuvo un efecto positivo sobre la dureza dado que los panes con xantana fueron los más suaves en el último día, i.e., los panes con 0.1% de xantana fermentados a 30 °C, (Figura 12b), sin embargo, estadísticamente no hay diferencias significativas en la dureza final debida a la adición de xantana. Es importante mencionar que la disminución de la dureza del pan es evidente aún con la mínima concentración de xantana; 0.1%. Esto coincide con lo reportado por Guarda et al. (2004) y Shittu et al. (2009), quienes consignan que los panes con mayores concentraciones de hidrocólide presentan menor dureza con respecto al último día de almacenamiento, pero no existe diferencia significativa con los panes de menores concentraciones. Por ello el uso de concentraciones bajas es suficiente para observar un efecto sobre la dureza.

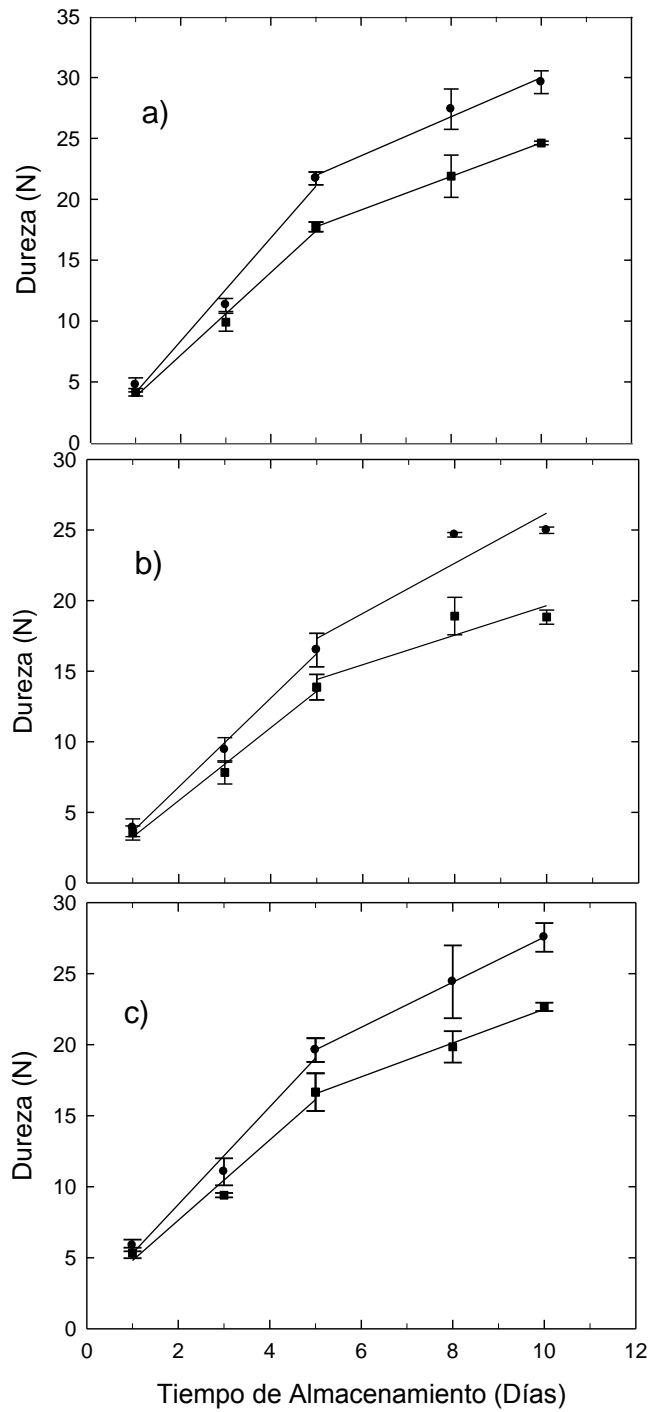


Figura 11. Cambio de la dureza con el tiempo de almacenamiento de pan sin xantana (a) y con 0.1 (b) y 0.5% (c) de xantana. La masa se fermentó a 40 °C. Dureza 1 y Dureza 2 designan esta propiedad en el primero y segundo ciclos de compresión, respectivamente. Las líneas son regresiones.

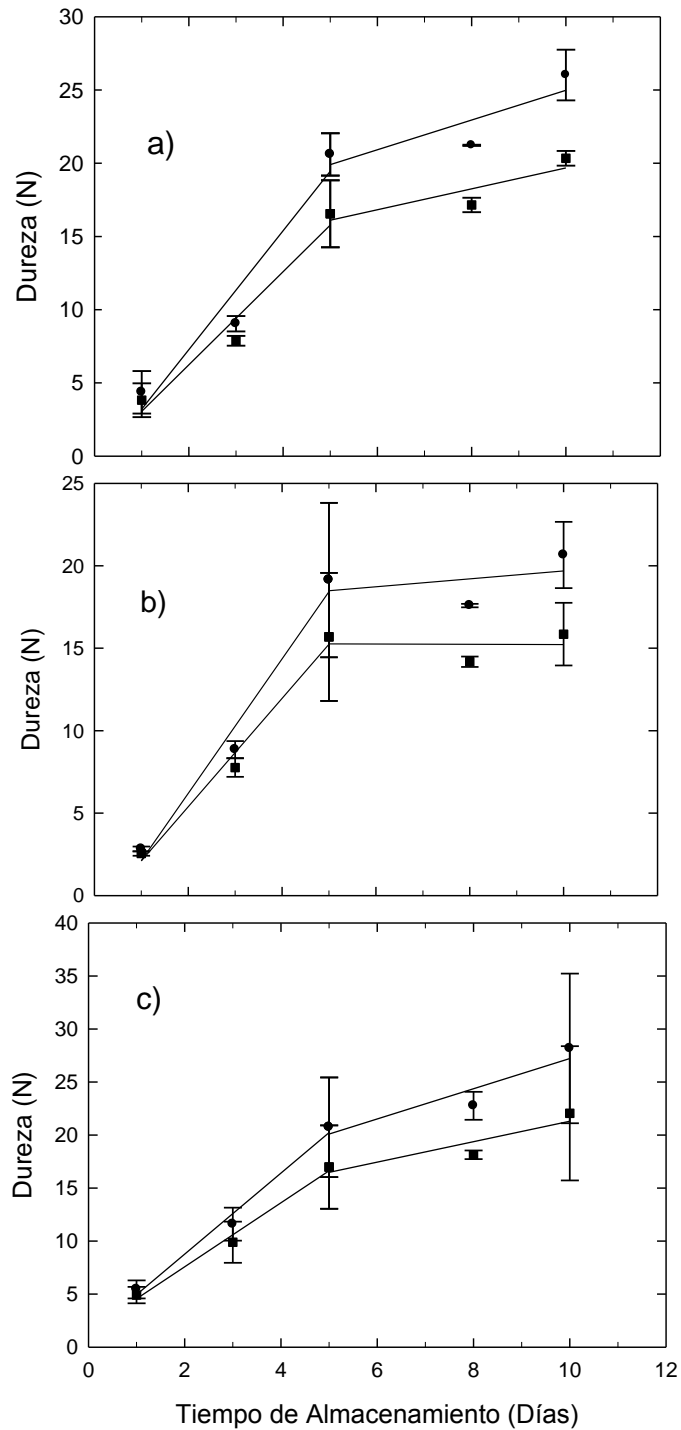


Figura 12. Cambio de la dureza con el tiempo de almacenamiento de pan sin xantana (a) y con 0.1 (b) y 0.5% (c) de xantana. La masa se fermentó a 30 °C. Dureza 1 y Dureza 2 designan esta propiedad en el primero y segundo ciclos de compresión, respectivamente. Las líneas son regresiones.

En la Figura 13 se puede observar el efecto de la adición de xantana sobre la dureza con respecto al tiempo de almacenamiento. Conforme transcurrió el tiempo, el pan con 0.1% de xantana y masa fermentada a 30°C, mostró la mayor dureza y el mayor aumento con respecto a la dureza inicial. El pan con 0.5% de xantana y masa fermentada a 40 °C fue el menos duro y con el menor aumento con respecto a la dureza inicial. Este pan fue el que presentó la mayor humedad y la menor pérdida de humedad con el tiempo de almacenamiento lo que permitió que su miga se conservara suave.

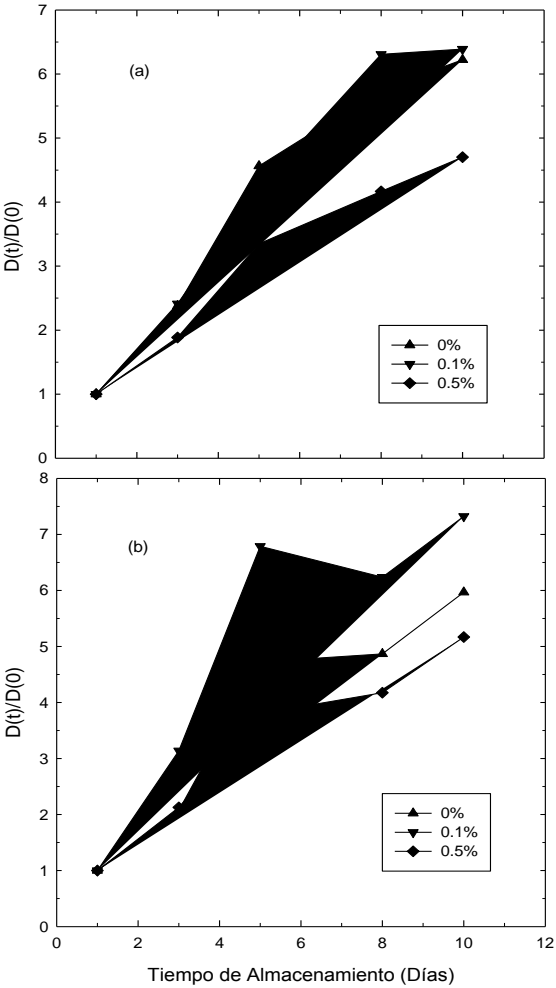


Figura 13. Cambio del cociente entre la dureza instantánea y la dureza inicial, $D(t)/D(0)$, con el tiempo de almacenamiento de pan con diferentes concentraciones de xantana para masa fermentada a 40 °C (a) y a 30 °C (b). El cociente se calculó únicamente con la Dureza 1.

Para mantener una más larga vida de anaquel, la retención de agua conduce a un mayor contenido de humedad. En consecuencia, la retrogradación de almidón y la firmeza del pan se retardan. Los hidrocoloides tienen por efecto debilitar la estructura del almidón, lo que conduce a distribuir mejor el agua y a mantener la rigidez de la miga. Además su carácter altamente hidrofílico ayuda a retener la humedad y mantener la miga más suave por más tiempo.

Como se muestra en la Figura 14, existe una correlación entre la humedad (%) y la dureza. La disminución en el contenido de agua corresponde con un aumento en la dureza del pan. Los panes preparados con 0.5% de xantana, y ambas temperaturas de fermentación, presentan la menor dureza y un mayor contenido de humedad comparados con los controles en el último día de almacenamiento. Asimismo, son los únicos en los cuales se observa una correlación lineal entre las variables. En los panes con 0 y 0.1% de xantana la correlación no es lineal sino de segundo orden. Esto se debe a que la dureza tiende a ser constante cuando el tiempo de almacenamiento es largo. El hecho de que la correlación entre la humedad y la dureza sea lineal para 0.5% de xantana, podría deberse a que en este caso la pérdida de humedad se retrasó y eso no permitió observar una zona de humedad constante para largos tiempos de almacenamiento. Esto confirma el efecto de la xantana ya mencionado anteriormente.

5.3.2 ELASTICIDAD

La elasticidad es una medida de la recuperación que muestra un material que está siendo deformado por una fuerza cuando repentinamente deja de aplicársele tal fuerza (Hleap & Velasco, 2010). La elasticidad de la miga de pan está fuertemente relacionada con la estructura de las paredes de las celdas de gas y depende principalmente del número y tamaño de los alveolos (Tournier, 2012). La elasticidad fue constante a lo largo del tiempo de almacenamiento y aproximadamente 12.6 mm para todas las concentraciones de xantana. Esto muestra que la estructura de los panes fue mecánicamente uniforme y que no es un buen indicador de estabilidad mecánica dado que no cambia con el tiempo y la presencia de xantana.

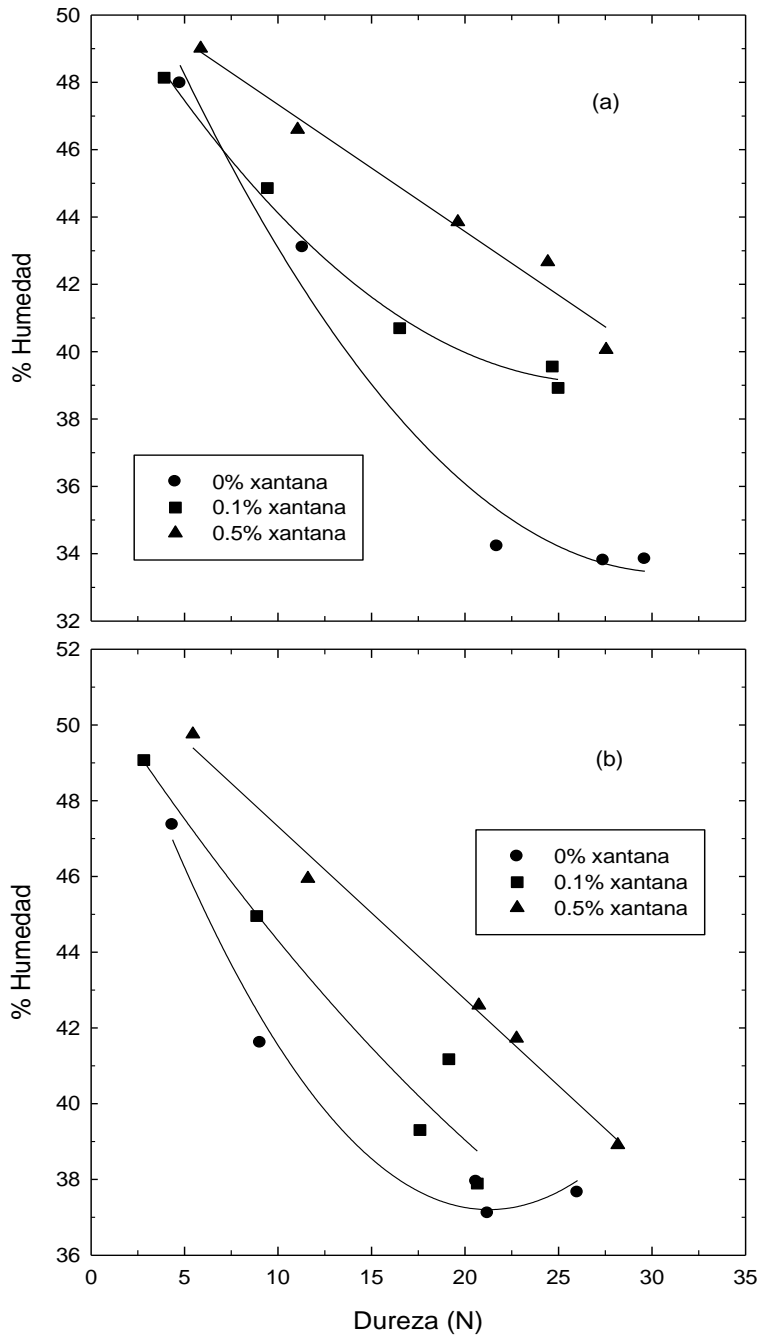


Figura 14. Relación entre la humedad y la dureza de pan con diferentes concentraciones de xantana con masa fermentada a 40 (a) y a 30 °C (b). Se representa solo la Dureza 1.

5.3.3 COHESIVIDAD

La cohesividad es la propiedad mecánica cuya magnitud indica hasta dónde puede deformarse un material antes de fracturarse; por ello valores grandes de cohesividad significan que el pan mantiene más su estructura ante la compresión (Hleap & Velasco, 2010).

En la Figura 15 se muestra el cambio de la cohesividad con el tiempo de almacenamiento de panes con diferente concentración de xantana. La tendencia general es de una ligera disminución progresiva de la cohesividad con el tiempo pero las diferencias entre las diferentes concentraciones de xantana no son significativas. El comportamiento observado es el esperado conforme transcurre el tiempo de almacenamiento, ya que debido a los cambios asociados con el envejecimiento, la estructura de la miga se torna más dura, frágil y quebradiza, haciendo que la cohesividad disminuya.

5.3.4 MASTICABILIDAD

La masticabilidad representa el trabajo necesario para desintegrar un alimento hasta que esté listo para ser deglutido (Hleap & Velasco, 2010). En la Figura 16 se muestra el cambio de la masticabilidad del pan con el tiempo de almacenamiento. La tendencia general muestra un ligero aumento de la masticabilidad con el tiempo, con los panes con 0% de xantana y ambas temperaturas, desde un punto de vista mecánico, los que tienen que ser masticados un mayor número de veces para poder ser deglutidos, mientras que los panes con 0.1% de xantana resultaron los de más fácil masticación, lo que coincide con los valores más pequeños de dureza. La masticabilidad del pan no presentó diferencias significativas en referencia con el control debido a la concentración de xantana o a la temperatura de fermentación de la masa.

5.3.5 GOMOSIDAD

La gomosidad es la energía requerida para desintegrar un alimento de modo que pueda ser deglutido (Hleap & Velasco, 2010). En la Figura 17 se observa que, de

manera general, la gomosidad aumentó con el tiempo, que los panes elaborados con xantana fueron los más suaves y que la gomosidad se mantuvo por debajo de la del control.

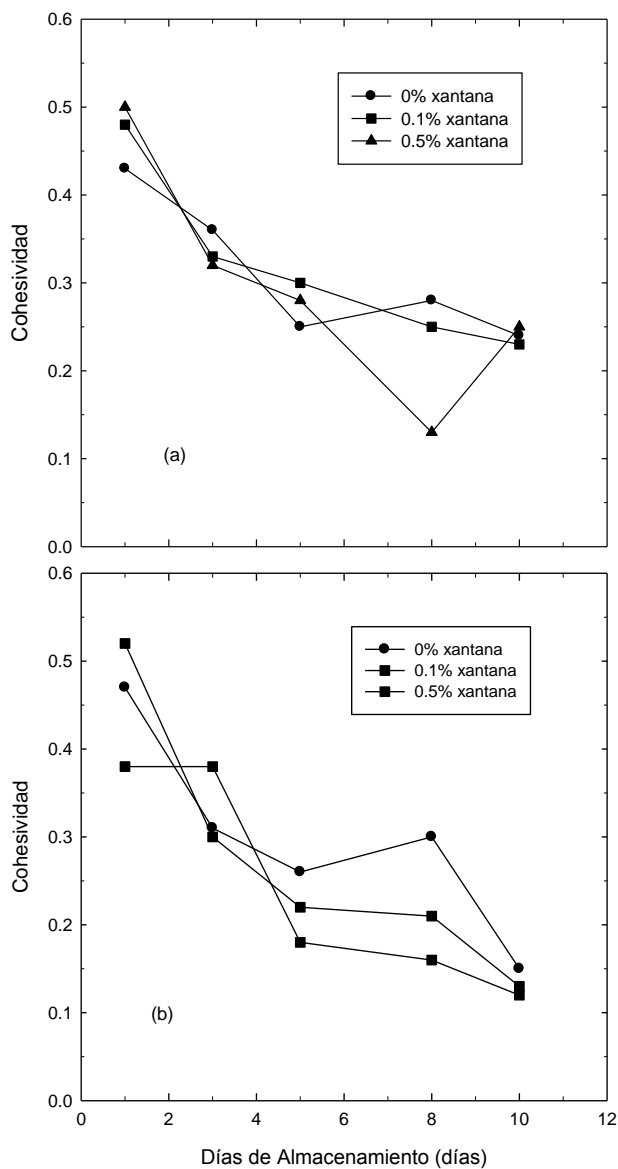


Figura 15. Variación de la cohesividad con el tiempo de almacenamiento de pan con diferentes concentraciones de xantana de masa fermentada a 40 (a) y a 30 °C (b). Desviación estándar: 0% (0.01-0.07), 0.1% (0.01-0.12) y 0.5% (0.00-0.07).

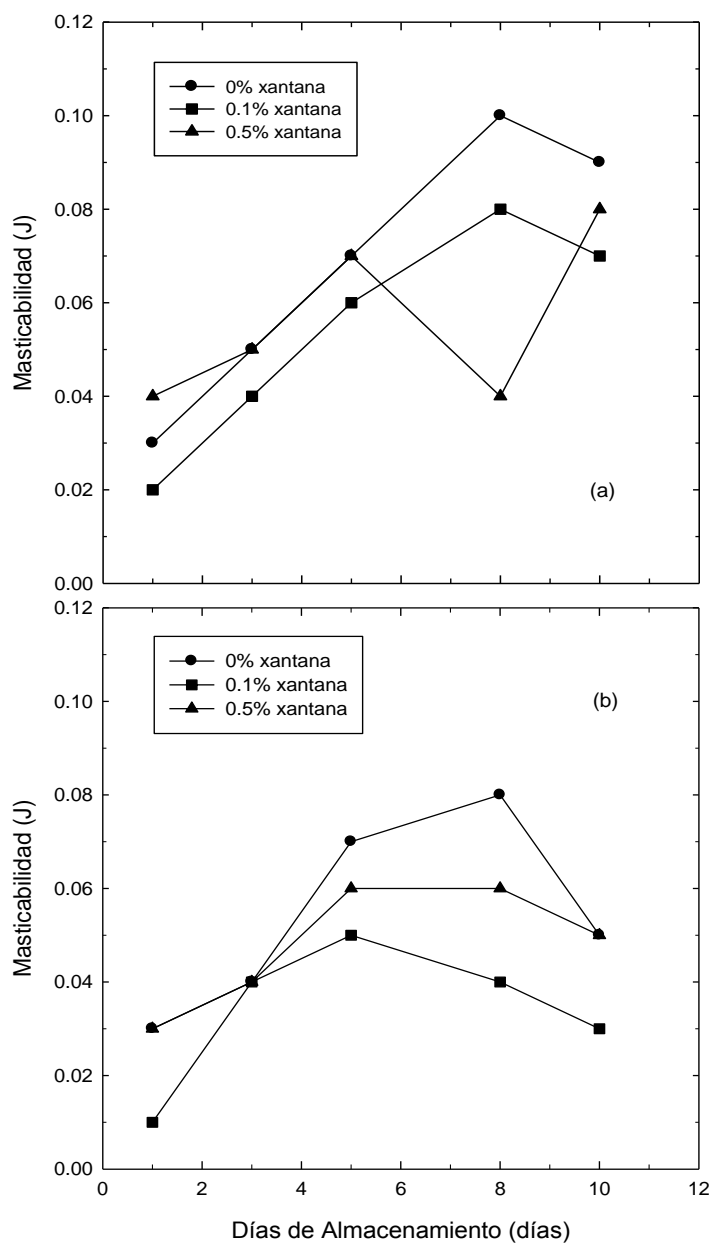


Figura 16. Variación de la masticabilidad con el tiempo de almacenamiento de pan con diferentes concentraciones de xantana de masa fermentada a 40 (a) y a 30 °C (b). Desviación estándar: 0% (0.00-0.02), 0.1% (0.00-0.04) y 0.5% (0.00-0.03).

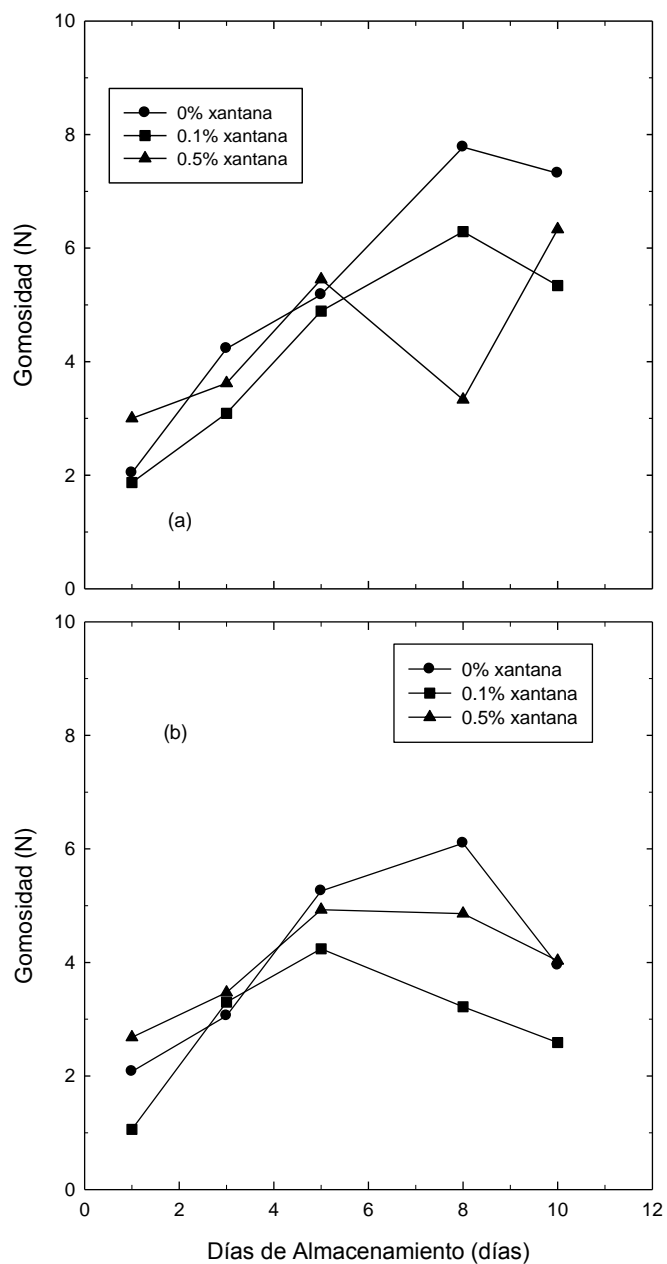


Figura 17. Variación de la gomosidad con el tiempo de almacenamiento de pan con diferentes concentraciones de xantana de masa fermentada a 40 (a) y a 30 °C (b). Desviación estándar: 0% (0.18-1.45), 0.1% (0.01-3.51) y 0.5% (0.17-2.64).

5.4 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

La Figura 18 muestra el termograma de la harina usada para preparar el pan, la cual estuvo formada por una mezcla de 70% de harina integral y 30% de harina blanca. En la figura se observa la transición térmica típica atribuida a la gelatinización de almidón la cual se presenta como un pico endotérmico suave sobre un intervalo amplio de temperatura. El fenómeno empieza a 56.82 °C, temperatura denominada inicial (T_0) la cual está asociada con el inicio del hinchamiento del gránulo debido a la entrada de agua en las zonas amorfas (Pineda et al., 2010). La temperatura máxima (T_m) es la temperatura en la que ocurre la máxima absorción de energía térmica o calor, que en el caso de la harina es 62.78 °C. A medida que el fenómeno termina, cesan prácticamente los cambios atribuidos a la gelatinización de almidón. La energía térmica necesaria para completar el fenómeno se conoce como entalpía de gelatinización (ΔH) y para la mezcla de harinas es 0.98 J/g de muestra.

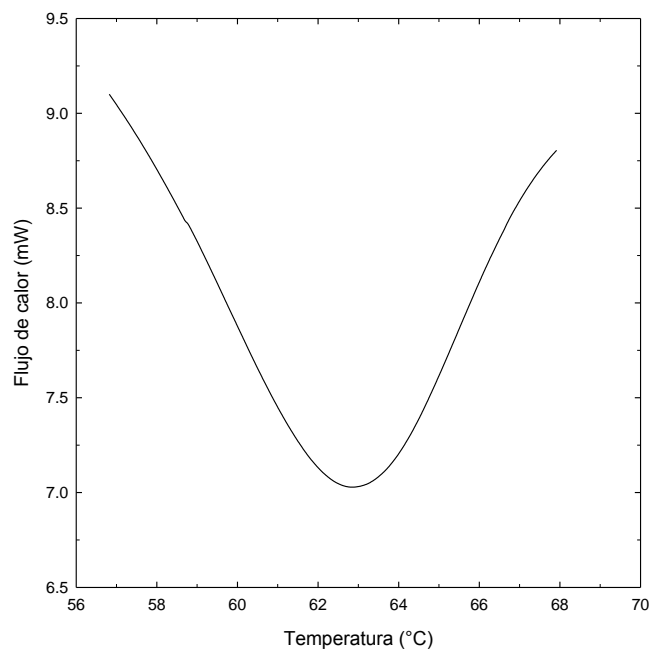


Figura 18. Gelatinización de almidón en una mezcla de harina integral y blanca en proporción 70/30 masa, respectivamente.

La Tabla 14 muestra los valores obtenidos de los termogramas para los diferentes panes. En todas las muestras se observó un único pico endotérmico que identifica la transición de gelatinización del almidón, en el cual el área bajo la curva permite determinar la entalpía de la transición y la temperatura de gelatinización asociada con la pérdida de estructura de los gránulos de almidón.

Tabla 14. Parámetros térmicos de las transiciones de calorimetría al inicio y al final del almacenamiento.

PAN (DÍA 2)		CALORIMETRÍA AL INICIO			
T de fermentación (°C)	Concentración de xantana (%)	T ₀ (°C)	T _m (°C)	T _f (°C)	ΔH (J/g)
Harina		56.82	62.78	67.91	0.98 ^a
40	0.0	37.64 ± 2.15	45.78 ± 0.05	54.43 ± 1.33	0.257 ± 0.052 ^a
40	0.1	36.76 ± 1.29	45.96 ± 0.55	54.65 ± 1.13	0.239 ± 0.034 ^a
40	0.5	40.18 ± 3.78	46.78 ± 0.85	54.08 ± 1.94	0.192 ± 0.009 ^a
30	0.0	39.69 ± 7.62	46.31 ± 1.02	53.66 ± 2.35	0.236 ± 0.033 ^a
30	0.1	36.34 ± 0.00	46.40 ± 0.00	59.24 ± 0.00	0.213 ± 0.000 ^a
30	0.5	37.45 ± 1.01	46.46 ± 0.21	54.41 ± 2.45	0.260 ± 0.012 ^a
PAN (DÍA 10)		CALORIMETRÍA AL FINAL			
40	0.0	34.99 ± 1.13	44.10 ± 0.06	53.24 ± 0.44	0.646 ± 0.037 ^b
40	0.1	38.47 ± 5.50	42.88 ± 0.74	51.55 ± 1.23	0.475 ± 0.001 ^b
40	0.5	37.09 ± 3.73	44.42 ± 1.22	50.62 ± 7.54	0.469 ± 0.098 ^b
30	0.0	34.83 ± 0.07	43.33 ± 0.11	52.64 ± 0.31	0.521 ± 0.026 ^b
30	0.1	35.48 ± 1.01	43.55 ± 0.33	52.71 ± 1.18	0.522 ± 0.076 ^b
30	0.5	34.78 ± 0.03	44.15 ± 0.22	53.74 ± 1.54	0.559 ± 0.030 ^b

Los resultados indican que la gelatinización ocurre en un intervalo de temperatura entre 36 a 54°C, lo que corresponde a la entalpía de fusión de los cristales de almidón que no gelatinizaron durante el horneado. La adición de xantana, así como la variación en la temperatura de fermentación no cambiaron de manera significativa

los valores de temperatura de gelatinización, tanto en el primer día de almacenamiento como en el último.

Una de las interpretaciones del comportamiento del almidón cuando se agregan hidrocoloides a la masa es que durante la gelatinización del almidón la amilosa se libera y sale del gránulo formando una matriz externa. Entonces, la amilosa tiene una mayor interacción con el hidrocolide que compite con la agregación amilosa-amilosa, y disminuye de esta manera la probabilidad de que ocurra la retrogradación (Mohammadi et al., 2014).

Estadísticamente, no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) en los valores de entalpía de gelatinización debidas a la adición de xantana o a las temperaturas de fermentación. El pan preparado con 0.5% de xantana cuya masa se fermentó a 40 °C, tiene el valor más pequeño de entalpía de fusión. Sin embargo, sí hay diferencia significativa en las entalpías iniciales con respecto al último día, en el cual se observa un aumento de aproximadamente el doble de la entalpía inicial, lo que indica que el almidón tiene niveles más altos de cristalinidad causada durante el almacenamiento.

Esto puede comprobarse mediante la cristalinidad relativa (DRC):

$$DRC = \frac{\Delta H_s}{\Delta H_f} * 100$$

Donde ΔH_s es la entalpía de fusión de los cristales que no gelatinizaron durante el horneado y ΔH_f la entalpía de gelatinización de la harina (Primo-Martín et al., 2007).

En la Tabla 15 se presentan los valores de cristalinidad relativa (DRC) de los panes. Los panes sin xantana tuvieron al segundo día una mayor cristalinidad (%) que aquellos con xantana, para cada temperatura, respectivamente. Conforme pasó el tiempo de almacenamiento, el arreglo cristalino se retrasó más en los panes con xantana; el pan preparado con 0.5% de xantana con masa fermentada a 40 °C fue el que mostró el menor nivel de cristalinidad. Entonces, este pan fue el más suave y con el mayor contenido de humedad.

Tabla 15. Entalpía de fusión y cristalinidad relativa (DRC) en pan.

DÍA 2		ΔH_s (J/g)	DRC (%)
40 °C	0.0%	0.257	26.224
40 °C	0.1%	0.239	24.388
40 °C	0.5%	0.260	26.480
30 °C	0.0%	0.236	24.031
30 °C	0.1%	0.213	21.735
30 °C	0.5%	0.192	19.541
DÍA 10		ΔH_s (J/g)	DRC (%)
40 °C	0.0%	0.646	65.867
40 °C	0.1%	0.475	48.469
40 °C	0.5%	0.469	47.806
30 °C	0.0%	0.521	53.112
30 °C	0.1%	0.522	53.214
30 °C	0.5%	0.559	56.990

6. CONCLUSIONES

Hay una correlación entre el contenido de humedad y la dureza conforme avanza el tiempo de almacenamiento; se observa una disminución del contenido de agua conforme la dureza del pan aumenta siendo estos dos parámetros los más sensibles al envejecimiento del pan.

La adición de xantana en la elaboración de pan integral mejoró las propiedades físicas y mecánicas, produciendo panes de menor diámetro, mayor altura, una miga más homogénea y compacta que el control. Se obtuvo una mayor humedad en los panes recién elaborados y en el último día de almacenamiento y panes con mayor dureza el primer día debido a que la estructura de la miga fue más compacta pero resultaron más suaves en el último día de almacenamiento.

Se obtuvieron dos zonas de variación de humedad y dureza; la primera del primero al quinto día y la segunda del quinto al décimo día de almacenamiento, donde la adición de 0.5% de xantana resultó en la menor tasa de pérdida de humedad y la menor tasa de aumento de dureza durante el almacenamiento.

Los parámetros de elasticidad y cohesividad del pan se mantuvieron estables durante los 10 días de almacenamiento y no presentaron diferencias significativas en referencia al control, por lo tanto, no son buenos indicadores de estabilidad mecánica.

Hubo un ligero aumento en la masticabilidad y la gomosidad de los panes con el tiempo, sin embargo no hay diferencias significativas en éstos parámetros debidos al uso de xantana.

No existieron diferencias significativas debidas a la temperatura de fermentación de la masa en el porcentaje de humedad, textura y entalpía de gelatinización.

Existe una diferencia significativa en la entalpía de gelatinización en el segundo día y en el último de almacenamiento; se observa un aumento de aproximadamente el doble de la entalpía inicial, lo que indica que el almidón tiene niveles más altos de cristalinidad relativa causada durante el almacenamiento.

La combinación más aceptable fue 0.5% de xantana y 40 °C de fermentación ya que resultó en una mejor apariencia física del pan, mayor humedad, menor dureza en el último día de almacenamiento y con menor cristalinidad relativa, por lo que la adición de xantana sí retarda el envejecimiento del pan integral.

7. RECOMENDACIONES

Realizar estudios de evaluación sensorial para que puedan ser comparados con las pruebas mecánicas y definir la concentración de xantana que sea más aceptada por el consumidor.

Examinar el efecto de diferentes hidrocoloides para compararlos con los obtenidos con la xantana y así determinar cuál retarda más el proceso de envejecimiento durante el almacenamiento.

Determinar las características reológicas de la masa, así como el efecto que tienen los hidrocoloides sobre ella.

8. REFERENCIAS

Álvarez, L. & Vallejos, R.H. (2001). El pan nuestro de cada día. CIENCIA HOY, 11. [En línea] Disponible en: <http://www.ciencia-hoy.retina.ar/hoy62/pan.htm> [Último acceso 15 Octubre 2015]

Ambrosio, L.A. (2011) Estandarización de tiempos de fermentación y horneado requeridos para la producción semicontinua en una panificadora. Tesis de Licenciatura en Ingeniería de Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Ávila, J. M., Beltrán, B., Cuadrado, C., del Pozo, S., Rodríguez, M. V., & Ruiz, E. (2007). La Alimentación Española: características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Baiano, A., Romaniello, R., Lamacchia, C. & La Notte, E. (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.

Baños, B. (2007) Caracterización Reológica de masas de harina de trigo adicionadas con fibra soluble. Tesis de Licenciatura de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

Borneo, R. (2013) Grano de Trigo: Estructura. Química, Ciencia y Tecnología de los Cereales. Universidad Nacional de Córdoba. [En línea] Disponible en: <http://cytcereales.blogspot.mx/2013/07/grano-de-trigo-estructura.html> [Último acceso el 17 de Marzo 2015]

D'Appolonia, B.L. & Morad, M.M. (1981) Bread Staling. *Cereal Chemistry*, 58, 186-190.

Dubois, D. (1990) Function of baking ingredients. American Institute of Baking. *Baking Production Technology*. USA.

FAO (2014) Composición química de alimentos. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S21.htm> [Último acceso el 13 de Octubre del 2014]

Forkish, K. (2012) Flavor, water, salt, yeast: The Fundamentals of Artesan Bread and Pizza. Ten Speed Press. USA, 25-88.

Gianola, G. (1985) La Industria Moderna de Galletas y Pastelería. Editorial Paraninfo. España.

Gremount International. Descripción y características de goma xantana. [En línea] Disponible en: <http://www.gremount.com.cn/spain/pdf/Goma%20xantana.pdf> [Último acceso el 13 de Octubre del 2014]

Guarda, A., Rosell, C.M., Benedito, C. & Galotto, M.J. (2004) Different hydrocolloids as improvers and antistaling agents. *Food Hydrocolloids*, 18, 241-247.

Hernández, M. & Durán, D. (2012) Características reológicas del pan de agua, producto autóctono de Pamplona. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 10, 61-74.

Hleap, J.I. & Velasco, V.A. (2010) Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 8, 46-56.

Hoseney, R.C. (1991). *Principios de Ciencia y Tecnología de los Cereales*. Zaragoza: Editorial Acribia, 201-230.

Jensen, C., Oestdal, H., Larsen, E. & Thybo, A.K. (2011) Chemical changes in wheat pan bread during storage and how it affects the sensory perception of aroma, flavor and taste. *Journal of Cereal Science*, 53, 259-268.

Kent, N.L. (1971). *Tecnología de los cereales*. Zaragoza: Editorial Acribia, 175-188.

Mandala, I.G. (2005) Physical properties of fresh and frozen stored, microwave-reheated breads, containing hydrocolloids. *Journal of Food Engineering*, 66, 291-300.

Márquez, J.L. (2001) Empleo de gomas en panificación para alargar la vida de anaquel. Tesis de Licenciatura en Química de Alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Matuda, T.G., Chevallier, S., Filho, P & Tadini, C.C. (2008) Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough. *Journal of Cereal Science*, 48, 741-746.

Mohammadi, M., Sadeghnia, N., Neyestani, T.R. & Mortazavian, A.M. (2014) Development of gluten-free flat bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1812-1818.

Montoya, J., Giraldo, G. & Lucas, J.C. (2012). Caracterización física de harina de trigo y pan mediante determinación de calorimetría diferencial de barrido y análisis termogravimétrico. *Vitae*, 19, 417-419.

NMX-F-083-1968. Norma Mexicana para la determinación de humedad en productos alimenticios () [En línea]. Disponible en:

<http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-083-1986.PDF> [Último acceso el 2 de junio del 2014]

Novotni, D. (2011) Influence of frozen storage and packaging on oxidative stability and texture of bread produced by different processes. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 643-649.

Pineda, P., Coral, D.F., Arciniegas, A., Rosales, A. & Rodriguez, M.E. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. *Ingeniería y Ciencia*, 6, 129-141.

Primo-Martín, C., Niewwenhuijzen, N.H., Hamer, R.J. & 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*. Editorial Acribia. España.

Rodríguez, P., San Martín, M.E. & González, G. (2001). Calorimetría diferencial de barrido y rayos-x del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada. *Superficies y Vacío*, 13, 61-65.

Rosell, C.M. (2011) *The Science of Doughs and Bread Quality*. Department of Food Science. Institute of Agrochemistry and Food Technology. Valencia, Spain.

SAGARPA (2014) Descripción del grano de trigo. [En línea]. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/trigo-grano/> [Último acceso el 21 de Octubre del 2014]

Scanlon, M.G. & Zghal, M.C. (2001) Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34, 841-864.

Selomulyo, V. O. & Zhou, W. (2007). Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers. *Journal of Cereal Science*, 45, 1-17.

Serna, O.S. (2001). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. México, D.F.: Editorial AGT EDITOR.

Sharma, B.R. & Narres, L. (2011). La goma xantana en la Industria Alimentaria. *Mundo Alimentario*, 20-25.

Shittu, T. A., Aminu, R. A. & Abulude, E. O. (2009). Functional effects of xanthan gum composite cassava-wheat dough and bread. *Food Hydrocolloids*, 23, 2254-2260.

Silverio, J., Svensson, E., Eliasson, A. & Olofsson, G. (1996). Isothermal microcalorimetric studies on starch retrogradation. *Journal of Thermal Analysis*, 47, 1179-1200.

Simsek, S. (2009). Application of xanthan gum for reducing syringing in refrigerated doughs. *Food Hydrocolloids*, 23, 2354-2358.

Steffolani, M.E. (2010) Efecto de las enzimas pentosanasa, glucosa oxidasa y transglutaminasa en productos de panificación. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.

Torres, V., Castillo, E., Álvarez, B., Guerrero, M.D. & Machuca, M. (2011) Procesos de panificación en la industria alimentaria. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 11, 739-745.

Tournier, C., Grass, M., Zope, D., Salles, C. & Bertrand, D. (2012) Characterization of bread breakdown during mastication by image texture analysis. *Journal of Food Engineering*, 113, 615-622.

Vaclavik, V.A. (2002). *Fundamentos de Ciencia de los Alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia.