



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA



**“ELABORACIÓN DE PAN DE CAJA A PARTIR DE MEZCLAS DE
HARINA DE TRIGO SUAVE Y TRIGO DURO SOMETIDO A UN
PROCESO TÉRMICO-ALCALINO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

MARÍA JIMENA BARROSO VELÁZQUEZ

DIRECTORA ACADÉMICA:

DRA. ANDREA YAZMIN GUADARRAMA LEZAMA

ASESOR EXTERNO:

M. en C.Q. HÉCTOR CARRILLO NAVAS

MAYO, 2017

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1. Trigo	6
1.2. Tratamientos térmicos en cereales	8
1.2.1. Tostado	10
1.3. Tratamientos alcalinos en cereales	10
1.3.1. Nixtamalización	11
1.4. Productos de panificación	12
1.4.1. Ingredientes y sus funciones	15
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. HIPÓTESIS	22
4. OBJETIVOS	24
4.1. Objetivo general	25
4.2. Objetivos específicos	25
5. MATERIALES Y MÉTODOS	26
5.1. Materiales	27
5.2. Métodos	27
5.2.1. Tostado	27
5.2.2. Nixtamalización	27
5.2.3. Caracterización de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado	28
5.2.3.1. Microscopía electrónica de barrido	28
5.2.3.2. Difracción de rayos X	28
5.2.3.3. Espectroscopia de infrarrojo	28

5.2.4. Preparación de masas para pan de caja	28
5.2.4.1. Imágenes ópticas	29
5.2.4.2. Volumen de fermentación	30
5.2.5. Horneado de las masas	30
5.2.6. Volumen específico del pan de caja	30
5.2.7. Análisis de color del pan de caja	31
5.2.8. Perfil de textura del pan de caja	31
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1. Caracterización de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado	34
6.1.1. Microscopia electrónica de barrido	34
6.1.2. Difracción de rayos X	35
6.1.3. Espectroscopia de infrarrojo	37
6.2. Imágenes ópticas de las masas	38
6.3. Volumen de fermentación de las masas	40
6.4. Volumen específico del pan de caja	41
6.5. Análisis de color del pan de caja	43
6.6. Perfil de textura del pan de caja	44
7. CONCLUSIONES	46
8. BIBLIOGRAFÍA	48
9. ANEXOS	55
9.1. Diagrama de proceso para elaboración de pan de caja.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ingredientes para la formulación de las masas para pan de caja	29
Tabla 2. Volumen específico de las diferentes formulaciones del pan de caja	41
Tabla 3. Parámetros de color de las diferentes formulaciones del pan de caja	43
Tabla 4. Análisis de perfil de textura de las diferentes formulaciones de pan de caja.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Microestructura de las diferentes muestras: (a) trigo duro, (b) trigo duro tostado-nixtamalizado (1 min), (c) trigo duro tostado nixtamalizado (2 min) y (d) trigo duro tostado nixtamalizado (4 min) 34
- Figura 2.** Patrones de difracción del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional 36
- Figura 3.** Espectros de infrarrojo del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional 37
- Figura 4.** Imágenes ópticas de las masas formuladas: (a) control, (b) 5.0%, (c) 10.0%, (d) 15.0% y (e) 20.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado 39
- Figura 5.** Incremento de volumen (%) de las masas formuladas con harina de trigo suave (control) y con diferentes concentraciones de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado 40
- Figura 6.** Imágenes ópticas del pan de caja formulado: (a) control, (b) 5.0%, (c) 10.0%, (d) 15.0% y (e) 20.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado 42

RESUMEN

RESUMEN

Se formularon 5 tipos de panes de caja con diferentes concentraciones de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado (0%, 5%, 10%, 15% y 20%) y se evaluó el efecto de la sustitución de harina en la microestructura, color y textura de los panes de caja. Los resultados mostrados durante el proceso térmico-alcalino aplicado al trigo duro mostraron que conforme se aumentó el tiempo de tostado del trigo, la estructura cristalina original del almidón comenzó a romperse produciendo una estructura altamente amorfa, existiendo cambios en las proteínas (gliadinas y gluteninas) y formación de complejos lípido-amilosa.

La harina de trigo duro tostado-nixtamalizado que presentó una mayor cantidad de proteínas en su estructura fue utilizada para elaborar los panes de caja. Durante la formulación de las masas se observó que al aumentar la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado hubo mayor presencia de fibra soluble afectando la fermentación al momento de la formación de la red de gluten y evitando el crecimiento rápido de la masa. Como consecuencia de esto, los volúmenes de los panes formulados fueron decreciendo conforme la cantidad de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado aumentó.

Los parámetros de color de los panes de caja mostraron que al aumentar la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado la luminosidad (L^*) fue mayor, a^* y b^* fueron menores presentando bajas tonalidades de rojos y amarillos. Por otro lado, los parámetros de textura como la dureza, adhesividad y masticabilidad aumentaron con respecto al incremento de harina de trigo suave sustituido en las diferentes formulaciones, presentando menor porosidad y tamaño de burbuja en la miga afectando la esponjosidad del pan de caja. Por lo tanto, en este estudio se ofrece una alternativa para el uso de trigo duro sometido a dos tipos de tratamientos (térmico-alcalinos) para la formulación de pan de caja y evaluar el efecto de la adición de trigo duros en las propiedades fisicoquímicas de los productos elaborados.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El pan es un producto obtenido a partir de la harina de granos, legumbres y algunos tubérculos que contienen cierto porcentaje de humedad, constituidos principalmente de almidón y proteína y en ocasiones se utiliza algún tipo de agente leudante, ya sea químico o biológico para mejorar su esponjosidad.

El trigo es uno de los principales granos consumidos y a partir del cual se elaboran diversos productos en la industria de alimentos. Una de las características que le proporciona un valor agregado a este grano es su contenido de proteínas, entre ellas el gluten, que es una red de proteína desarrollada durante el mezclado de la harina con el agua la cual está formada por gliadinas y gluteninas, que al ser combinadas con el agua forman una masa viscoelástica.

Además del pan, existen muchos otros productos derivados del trigo como pasteles, galletas, fideos. Los productos provenientes del trigo duro más conocidos son los panes planos, los cuales son elaborados con harina de este tipo de trigo y no de la sémola (producto obtenido mediante la molienda del trigo duro).

En los últimos años se ha incrementado el interés por el desarrollo de nuevos productos por la modificación de las características físicas o químicas de los materiales nativos con los cuales se elaboran productos derivados o bien, por la utilización de metodologías que modifiquen dichas características, tal es el caso de los tratamientos térmicos y alcalinos en cereales que comúnmente no son utilizados en la industria de la panificación. Con la aplicación de este tipo de tratamientos es posible modificar las características fisicoquímicas de los cereales como el trigo duro y mejorar las características de los productos de panificación, conservando la formulación tradicional y evitando el uso de emulsificantes, enzimas y aditivos.

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Trigo

El trigo es una de las fuentes más importantes de nutrientes en México, especialmente en zonas de escasos recursos. Así mismo, el procesamiento y consumo del trigo es una gran fuente de empleos en distintos sectores de la producción de este grano (Peña *et al.*, 2008). El trigo es el único cereal con el que se puede producir harina para panificación ya que la masa obtenida de ésta harina tiene las propiedades necesarias para la producción de pan.

Aproximadamente la mitad de los cereales producidos en la Unión Europea pertenece al grano de trigo. Actualmente la Unión Europea es el mayor exportador de trigo ya que produce el 145% del trigo, Francia, Alemania y el Reino Unido son los principales productores de este grano, siendo los principales mercados para consumo humano y animal. (Finch *et al.*, 2002).

Existen diferentes clasificaciones para los tipos de grano de trigo según la textura del endospermo y el contenido de proteína, siendo la concentración de proteína la que nos ayuda a saber si son granos duros o suaves, de esta manera podemos saber si el trigo que se está utilizando tiene las propiedades adecuadas para la elaboración de pan.

La mayor parte del trigo duro tiene calidad panificable, mientras que una cantidad de trigo suave también tiene esta calidad para la elaboración de pan (Edwards 2007; Kent & Evers, 1994). El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) es clasificado por la dureza del grano como: suave, el cual es utilizado para productos de repostería; semi-duro y duro, son comúnmente utilizados para la elaboración de productos de panificación. (Peña *et al.*, 1998).

Como se mencionó anteriormente otra de las variedades del trigo es el trigo duro, el cual se cultiva principalmente en las ciudades del sur de Europa. Gran parte de

este trigo duro, es utilizado en el mercado interno, únicamente una pequeña parte se utiliza para exportación. Si se cultiva correctamente, el trigo duro tiene un contenido alto de proteína. Durante el proceso de molienda se rompe uniformemente en grandes fragmentos llamados semolina, la cual se transforma en un gran rango de pasta de alta calidad por medio de la extrusión de una masa rígida (Finch et al., 2002). El trigo duro, por su composición genética es el más duro de todas las especies de trigo. Es una especie tetraploide, tiene siete cromosomas en 14 pares, a diferencia del trigo para la elaboración de pan que es hexaploide, teniendo seis pares de siete cromosomas. Las mejores variedades de trigo duro son aquellas que tienen el endospermo traslúcido y tienen un color ámbar, por otro lado, el trigo de menor calidad comúnmente se utiliza como alimento para animales.

El trigo duro es difícil de reducir su tamaño de partícula en el proceso de molienda y se utilizan molinos especiales para este proceso, el objetivo principal es separar el germen del endospermo y así poder reducir su tamaño (150 a 500 micras). La harina de trigo duro contiene una gran cantidad de almidón dañado, por lo que absorbe más cantidad de agua que las otras variedades de trigo (Brockway, 2001).

La dureza del trigo es de suma importancia para conocer la capacidad que tienen las harinas derivadas de este trigo de absorber el agua. Para la elaboración de pan, es preferible utilizar la harina de trigo semi-duro a duro debido a que esto favorece la fermentación durante el proceso de panificación, e influye en la humedad del producto terminado (Peña *et al.*, 2008).

Es importante conocer el contenido de proteína en el trigo para la elaboración de los diferentes productos provenientes de este grano. Para la elaboración de pasteles y galletas, la cantidad de proteína de harina de trigo suave debe ser del 10%, mientras que, en la harina de trigo duro para la producción de pasta, el porcentaje de proteína suficiente es del 14-15%. El porcentaje ideal de contenido

de proteína para la elaboración de pan es de 12-13% para que se pueda obtener un producto final de volumen, textura y estructura ideales (Arendt & Zannini, 2013).

1.2. Tratamientos térmicos en cereales

La disponibilidad y la estructura de la proteína contenida en el trigo presenta cambios durante los procesos de tratamientos en los granos, al igual que el almidón (Baiano *et al.*, 2009). Los procesos térmicos provocan una ruptura de las estructuras tridimensionales de los componentes de la proteína y del almidón, provocando mayor disponibilidad como sustratos para las enzimas del tracto gastrointestinal.

Los productos elaborados a base de cereales, inevitablemente son sometidos a algún tipo de cocción, este proceso puede ser tan simple como hervir los granos, pero también se pueden crear sistemas complejos en donde se requiere del mezclado con otros ingredientes para formar una masa, seguido de esto un proceso de cocción, que para el caso de productos de panificación sería el horneado. La tecnología implementada para la fabricación de ciertos productos es importante desde el punto de vista nutricional, así como los ingredientes utilizados. En cuanto al valor nutrimental de los productos terminados, el efecto más importante de la aplicación de procesos térmicos son el contenido de vitaminas y la estructura fisicoquímica de los carbohidratos que están presentes en el producto terminado (Alldrick *et al.*, 2002).

Durante el proceso de horneado de los panes se requiere que el cambio de temperatura ayude a que fenómenos como la expansión de gas, la desactivación de las levaduras, gelatinización del almidón, desnaturalización de las proteínas y la formación del sabor se presenten. Los cambios de temperatura ayudan a que estos cambios físicos y químicos ocurran a diferentes niveles de la barra de pan y a diferentes tiempos durante el proceso (Dobraszczyk *et al.*, 2001).

El color característico de los productos de panificación durante el proceso de horneado es comúnmente conocido como pardeamiento. Este efecto es el resultado de una reacción no enzimática la cual produce compuestos de color durante el horneado, estas reacciones se conocen como reacciones de Maillard y reacciones de caramelización (Purlis, 2010).

La reacción de Maillard necesita de un azúcar reductor, como cetosas o aldosas y un grupo amino libre, ya sea de una proteína o un aminoácido, con esto se producen compuestos como las melanoidinas que van desde un tono amarillo claro hasta café o incluso pueden llegar a dar una tonalidad negra, además de sustancias que generan sabores específicos. Uno de los factores importantes que influyen en esta reacción es el pH. A un pH alcalino la velocidad de la reacción incrementa llegando a su máximo cuando alcanza un pH 10, siendo pocos los alimentos que tienen un pH mayor a 7, por otro lado, la reacción se inhibe a condiciones ácidas.

La reacción de caramelización ocurre cuando los azúcares se calientan a temperaturas que van arriba de su punto de fusión. Esta reacción a diferencia de la reacción de Maillard, se efectúa tanto a pH ácido como alcalino y se acelera en presencia de ácidos carboxílicos y algunas sales. Comúnmente se presentan en alimentos que son sometidos a algún proceso térmico como los productos de panificación (Badui, 2013).

Existen 5 procesos que ocurren durante el proceso de horneado: 1. Incremento de la producción de gas por la aceleración de la actividad de las levaduras presentes (a una temperatura entre 50 °C y 60 °C la levadura se muere) por lo tanto se obtiene un mayor volumen en el pan. 2. Expansión de gas debido al incremento de la temperatura. 3. Evaporación del agua, CO₂, y etanol. 4. Coalescencia y ruptura de las burbujas de gas. 5. Ajuste de la estructura de la esponja (Dobraszczyk *et al.*, 2001).

1.2.1. Tostado

La aplicación de tratamientos térmicos a los cereales, como lo es el tostado, provoca cambios en el almidón y la estructura de la proteína presente en el grano, así como su disponibilidad. Como consecuencia de este tipo de tratamientos térmicos, los grupos hidrofóbicos de la superficie se ven expuestos, haciendo que éstas proteínas se vuelvan insolubles previniendo alguna hidratación sucesiva y la formación de masa. La aplicación de altas temperaturas también tiene como resultado la coagulación de las albúminas y globulinas que están presentes en la harina de trigo.

Una de las aplicaciones del tostado de cereales es en el pan elaborado con trigo tostado, el cual al igual que la pasta de trigo tostado se encuentran en la lista de los alimentos tradicionales más consumidos en Italia. Éste se produce a partir de una mezcla de harina de trigo suave y una harina integral obtenida de los restos de la cosecha que previamente ha sido quemada. Las personas de bajos recurso buscaban entre las cenizas los granos que habían quedado y los procesaban. Al ser granos quemados, lo que se producía del grano, tenía un color café, un sabor y aroma a asado. Actualmente, la operación de quemar los granos se ha sustituido por un proceso de tostado de los granos que ya han sido cosechados y separados de la espiga. Al reemplazar una parte de la harina de trigo por harina de trigo tostado se pueden tener cambios en las propiedades físicas y mecánicas en la miga del pan y su corteza (Baiano *et al.*, 2009).

1.3. Tratamientos alcalinos en cereales

Los tratamientos alcalinos utilizando agentes como hidróxido de sodio son utilizados para la producción de diferentes tipos de alimentos como lo son las tortillas, fideos instantáneos, entre otros, para mejorar ciertas características como lo son el color, sabor y textura, así como proporcionar una textura firme y elástica al producto. Durante el periodo de remojo en una solución alcalina, el almidón pasa por diferentes cambios en su microestructura y sus propiedades fisicoquímicas, estos cambios pueden variar dependiendo del tipo de agente

alcalino, la concentración utilizada, el tiempo de remojo y el tipo de almidón. Algunas de las propiedades funcionales de los granos que se alteran durante el remojo son el poder de hinchamiento, gelatinización y perfil de pegado. (Nadiha *et al.*, 2010; Wang & Copeland, 2012).

1.3.1. Nixtamalización

El proceso de nixtamalización normalmente es aplicado a granos de maíz para la producción de masa para elaborar tortillas y otro tipo de productos a base de maíz (Arendt & Zannini, 2013). Este proceso consta de un tratamiento térmico-alcalino, en el cual los granos de maíz son calentados y remojados en una solución saturada de hidróxido de calcio; por cada kilogramo del grano se añaden de 2 a 3 litros de agua agregando el 1% de Ca(OH)_2 .

Durante el periodo de remojo, los granos de maíz absorben agua y se reblandecen, otro de los cambios que se presentan en esta etapa de la nixtamalización es el cambio en la cristalinidad del almidón (Robles *et al.*, 2012; Valderrama *et al.*, 2015). Las altas temperaturas (85°-100°C) a las que es sometido el grano y el pH, provocan cambios en los componentes del grano como las proteínas, lípidos y el almidón (Méndez-Montealvo *et al.*, 2008). La solución de hidróxido de calcio permite la absorción del agua, la distribución en los componentes y modifica las capas externas del grano, provocando que el pericarpio adquiera una textura viscosa. En cuanto al germen, su presencia se mantiene aún después de la nixtamalización dando una mayor tolerancia de mezclado de la masa, así como menor susceptibilidad a romperse (Guzmán *et al.*, 2011).

Los cambios fisicoquímicos que ocurren durante la nixtamalización, son el resultado de la aplicación de temperatura, adición y remojo de los gránulos en una solución saturada de calcio y finalmente el proceso de molienda. Todos estos factores mejoran notablemente la calidad nutricional del grano, pero también tienen un efecto en la gelatinización del almidón, una saponificación parcial de los

lípidos y la solubilización de algunas proteínas que rodean al almidón (Arendt & Zannini, 2013).

1.4. Productos de panificación.

El pan ha sido uno de los alimentos básicos para varias culturas alrededor del mundo. Es uno de los productos más antiguos sometido a un “proceso” hecho y consumido por el hombre. Uno de los primeros panes que se elaboró fue únicamente mezclando harina y agua seguido por un horneado de la masa producida y sometido a cocción en un horno de piedras calientes. Existen diferentes variedades de pan, tamaños, formas, colores, texturas y sabores. También contienen diferentes ingredientes e incluso el proceso de elaboración puede llevarse a cabo bajo diferentes condiciones. El pan que actualmente consumimos pasa por un proceso de fermentación, este proceso fue implementado por primera vez por los egipcios hace aproximadamente 5000 años (Zhou & Therdthai, 2006).

Como se ha mencionado, existen diferentes variedades de productos en el área de panificación, algunos ejemplos de estos son:

- **Hojaldre.**

Es un producto laminado, esto significa que cada capa de masa está separada por cierta cantidad de grasa (preferentemente mantequilla) ocasionando que, al ser cocinado el agua contenida en la masa se convierte en vapor haciendo que cada capa se separe.

- **Pasta brisa o masa quebrada.**

Esta masa se utiliza normalmente como bases de tartas ya sean dulces o saladas. Al ser un producto en donde no se necesita la formación de gluten, se utiliza harina que no tenga las mismas propiedades que la harina que se utiliza para la producción de pan.

- **Pasta con agua caliente.**

Esta masa tradicionalmente es utilizada en los pasteles de carne, también conocidos como empanadas. A esta masa se le da la forma cuando se le está añadiendo el relleno. Se dice que hace mucho tiempo se consideraba un problema el realizar este tipo de masa, ya que, si se realiza de la manera tradicional, colapsaría. La solución a este problema fue mezclar la masa con agua caliente, lo que provoca una gelatinización parcial del almidón y al mismo tiempo la grasa se derrite haciendo más rápido el proceso de mezclado. La vida de anaquel de este tipo de masa depende más del relleno que sea utilizado que de la misma masa.

- **Biscochos.**

El proceso original de este producto consistía en cocinar una masa compuesta de harina y agua únicamente y después secarla permitiendo que la vida de anaquel fuera mayor. El término “bizcocho” ahora se le conoce como galleta ya que los americanos adoptaron esta palabra al referirse a un pastel pequeño. Actualmente los ingredientes para la elaboración de las galletas han cambiado para proporcionar diferentes texturas y sabores. Las masas duras son generalmente utilizadas para la elaboración de galletas saladas, la masa para estas galletas contiene baja cantidad de grasa y azúcar, pero generalmente altas en contenido de agua. A diferencia de la masa dura, la masa semidulce contiene mayor cantidad de grasa y azúcar, generalmente la temperatura de mezclado debe ser aproximadamente 45 °C y el tiempo de mezclado no es crítico en este tipo de masa.

Por otro lado, están los batidos los cuales son mucho más suaves que los anteriormente mencionados, generalmente llevan huevo y son muy similares a los pasteles por lo que su proceso es muy parecido.

- **Obleas.**

Este producto a veces es conocido como otra variedad de galleta, lo que no es correcto. Al contrario de las galletas, las obleas son productos bajos en grasas y

azúcares. Hay diferentes tipos de obleas, algunas de estas se sirven con helados, otras son cubiertas con chocolate y se distribuyen como productos de confitería. Pero lo que tienen en común todos los tipos de obleas es que son horneadas con un bajo contenido de humedad, similar a las galletas (Edwards, 2007).

- **Pasteles.**

Similar a las galletas, los pasteles son difíciles de definir, ya que existe una gran variedad de formulaciones. Comúnmente en los pasteles se utilizan agentes leudantes y/o levaduras para obtener un producto con un volumen aceptable. Son los productos que más ingredientes contienen a diferencia de los otros productos de panificación, conteniendo altas cantidades de azúcar, huevo y grasa en proporción al contenido de harina, dando como resultado los sabores y texturas característicos de los pasteles (Townsend, 2001).

Uno de los principales productos de la panificación es el pan de caja, el cual se considera de buena calidad cuando tiene el volumen suficiente, apariencia atractiva al consumidor en cuanto al color y la forma, que tenga una miga fina y uniforme y sea lo suficientemente suave al paladar, pero al mismo tiempo que tenga firmeza y que permita ser rebanado (Kent & Evers, 1994).

La elaboración de pan requiere de pocos ingredientes, pasar por un proceso de mezclado, fermentación y finalmente horneado. Los ingredientes básicos para la producción de pan son harina, agua, levadura y sal; sin embargo, a lo largo del tiempo las personas han observado que los únicos ingredientes indispensables para poder hacer pan son harina y agua. Con el paso del tiempo se descubrió que la sal y la levadura únicamente incrementan el sabor y la ligereza del pan (Arendt & Zannini, 2013). Otros de los ingredientes que también pueden ser añadidos son harinas provenientes de otros cereales son la grasa, emulsificantes, agentes leudantes, productos lácteos, fruta, entre otros. Cuando todos los ingredientes son mezclados en las proporciones correctas ocurren 3 fenómenos: 1. La proteína proveniente de la harina comienza a hidratarse formando el gluten que al ser

cohesivo forma una red tridimensional la cual hace que las partículas de la harina se junten formando una masa. 2. Se forman burbujas en la masa, las cuales durante el manejo de la masa se van dividiendo formando algo similar a una espuma manteniendo las burbujas atrapadas en la red de gluten. 3. Las enzimas contenidas en la levadura comienzan a fermentar los azúcares presentes en la harina, los azúcares liberados comienzan a romperlas generando alcohol y dióxido de carbono, que en conjunto con las burbujas de aire hacen que la masa incremente su volumen, también llamada aireación (Dobraszczyk *et al.*, 2001; Kent & Evers, 1994). El agua no sólo es importante para que la red de gluten pueda formarse, también ayuda a que las propiedades de la masa mejoren, así como mejorar la solubilidad de los componentes de la harina (Arendt & Zannini, 2013).

El pan elaborado a partir de trigo duro se produce a partir de harina proveniente de esta variedad y no de la sémola. A diferencia de la harina de trigo suave, el gluten de la harina de trigo duro es más fuerte y no tiende a extenderse de la misma manera, la masa tiene mayor estabilidad, mayor daño del almidón, una mejor absorción de agua y partículas de mayor tamaño. Debido a la propiedad de gran absorción de agua el pan de trigo duro tiene una mayor vida de anaquel que el pan realizado con harina de trigo suave (Arendt & Zannini, 2013).

1.4.1. Ingredientes y sus funciones

El desarrollo de los sabores característicos de los productos fermentados proviene de los ingredientes utilizados y de los procesos a los que son sometidos. La harina tiene un sabor muy tenue de la cual la mayor parte del sabor es aportado por los aceites, el germen y cualquier tipo de fibra presente. La utilización de sal para la elaboración del pan es lo que más aporta sabor a este tipo de productos, ya que aporta el sabor “salado” y ayuda a potenciar los sabores de los otros ingredientes utilizados para elaborar pan, los porcentajes de sal en la formulación dependen del tipo de pan que se quiera elaborar. Por otro lado, la cantidad de levadura utilizada, la grasa, el azúcar y la leche también aportan un sabor único al pan (Cauvain *et al.*, 2001).

Harina: La harina con cualidades panificables requiere de las siguientes características:

- La cantidad de proteína contenida en la harina debe ser adecuada (9.5) para que al ser hidratada se forme una red de gluten resistente, obteniendo una buena elasticidad, fuerza y estabilidad en la masa formada.
- Propiedades de retención de gas: los niveles de actividad de la amilasa y del almidón dañado deben ser adecuados para producir suficientes azúcares, para soportar la actividad de las enzimas de la levadura durante la etapa de fermentación.
- Contenido de humedad: que no sea mayor al 14% para que se pueda almacenar de manera segura, obtener un color adecuado y cumpla con las especificaciones en cuanto al blanqueo y tratamientos (Kent & Evers, 1994).

Si la harina utilizada se trata de otros granos de cereales o de leguminosas hay que indicarlo, por ejemplo: harina de maíz, harina de cebada, etc. Por otro lado, si en la harina aparecen todos los componentes del grano se llama harina integral (Mesas & Alegre, 2002).

Almidón: Es el polisacárido de reserva más importante y el componente más abundante de varias plantas incluyendo los cereales, presenta gránulos semi-cristalinos. Cuenta con propiedades únicas, las cuales determinan la funcionalidad de las aplicaciones que tiene, particularmente en la elaboración de productos de panificación. Los componentes principales del almidón son polímeros provenientes de la glucosa, amilosa y amilopectina. La proporción de amilosa-amilopectina varía entre los tipos de almidones, pero los porcentajes más comunes son de 25-28% de amilosa y 72-75% de amilopectina. El grado de orden en el gránulo de almidón y la orientación de las macromoléculas perpendiculares a la superficie del gránulo permite la birrefringencia de los gránulos, haciendo que éstos sean visibles con luz polarizada. Durante la elaboración de la masa el almidón absorbe hasta el 46% del agua. Se ha sugerido que el almidón actúa como un relleno inerte en la red de proteína de la masa (Goesaert, *et al.*, 2005; Matz, 1991).

Gluten: Está constituido por gluteninas y gliadinas, las cuales suman el 85% de la proteína presente en el trigo, al ser mezcladas con agua y lípidos, forman una red llamada gluten, el cual es responsable de la cohesividad y viscoelasticidad necesaria en una pasta panificable (Badui, 2013). Las proteínas del gluten se encuentran en el endospermo del grano de trigo en donde forman una matriz continua alrededor de los gránulos de almidón, estas proteínas son altamente insolubles en agua o en soluciones salinas. Las propiedades no comunes del gluten, permiten que la harina sea transformada en una masa con las características adecuadas para la elaboración del pan. Durante la producción del pan, las proteínas del gluten son transformadas en una red cohesiva y viscoelástica. La calidad y cantidad de las proteínas del gluten determinan los requerimientos del mezclado de la masa y la sensibilidad que pueda tener si el tiempo y la fuerza del mezclado son mayores (Goesaert, *et al.*, 2005).

Azúcar: La sacarosa comúnmente se extrae de la caña de azúcar y es la más utilizada para la producción de pan. La adición de azúcar puede ser en forma cristalina o líquida. Cuando es añadida en forma sólida, una parte o toda se disuelve en el agua durante el mezclado. A 25 °C, 65 g de sacarosa se disuelve en 100 g de agua y la solubilidad incrementa a altas temperaturas (Belitz *et al.*, 2004). El azúcar no es un ingrediente esencial en el pan, pero su adición beneficia en el color, dando un color café, un sabor dulce, ablandamiento y ayuda a preservar la humedad por absorción de la misma (McGee, 2004). El azúcar se añade al inicio de la fermentación, la adición del 1-2% de azúcar acelera la producción de dióxido de carbono producida por la levadura. Sin embargo, la presencia excesiva de azúcar tiene un efecto negativo en el pan, en concentraciones mayor al 10%, tiene un efecto de debilitar la red de gluten ya que compiten por el agua que está disponible (Mondal, 2008; Trinh *et al.*, 2015).

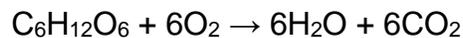
Sal: Es añadida para fortalecer el gluten y convertir la acción de la levadura para controlar la expansión de la masa debido a la levadura (Mondal, 2008). La función básica de la sal en la masa para pan, es ayudar a mejorar el sabor; muy poca

cantidad de sal hace que se tenga muy poco sabor en el producto final y mucha sal provee un sabor muy salado. También tiene una función inhibitoria en cuanto a la formación de la red de gluten dependiendo de la velocidad de mezclado, a alta velocidad el efecto es menor a diferencia de una velocidad de mezclado baja (Cauvain *et al.*, 2001).

Levadura: Es un hongo unicelular y la cepa que se utiliza para la elaboración del pan se llama *Saccharomyces cerevisiae*. La levadura puede trabajar anaeróbicamente o aeróbicamente y en ambos casos el sustrato es glucosa (Edwards, 2007). Cuando trabaja de forma anaerobia produce alcohol y dióxido de carbono:



Cuando se trabaja de manera aerobia produce agua y dióxido de carbono:



La principal función es la producción de CO_2 para expandir la masa durante el proceso de elaboración, hasta los primeros momentos del horneado (Cauvain *et al.*, 2001). La cantidad de levadura utilizada tiene una relación inversa a la duración de la fermentación, largos periodos de fermentación generalmente utilizan cantidades menores de levadura. La utilización del 1% de levadura lleva a un tiempo de fermentación de 3 h, mientras el 2-3% de levadura no necesita tiempo de fermentación. La actividad de la levadura incrementa dependiendo de la temperatura a la que se encuentre la masa. Además de la producción de dióxido de carbono para el incremento de volumen del pan, también tiene efectos reológicos disminuyendo el pH del pan, atribuye sabor y color al producto final (Kent & Evers, 1994).

Lácteos: Los ingredientes lácteos se agregan al pan por sus efectos nutricionales y beneficios funcionales. Los efectos nutricionales se refieren al incremento en el contenido de calcio, el contenido de proteína y el suplemento de aminoácidos esenciales como lisina, metionina y triptófano. Los beneficios funcionales de la

adición de este tipo de ingredientes son la mejora del manejo de la masa, sabor y color de la costra, las características de tostado, la estructura y textura de la miga del pan como resultado de la adición de la grasa y proteína de la leche (Kenny *et al.*, 2000).

Agua: Las propiedades de la masa pueden ser afectadas por la cantidad de agua utilizada, si se agrega muy poca agua, la masa será muy firme y difícil de trabajar con ella y se obtendrán panes de tamaño pequeño y una apariencia no muy atractiva, en cambio al agregar una gran cantidad de agua, la masa será muy suave y difícil de moldear, ya que la masa será muy fluida y como resultado será un pan de calidad baja (Cauvain *et al.*, 2001). Aproximadamente el 46% del agua presente en la masa se asocia con el almidón, el 31% con la proteína y el 23% con gomas. La absorción del agua de una harina de trigo es regida por el contenido y la calidad de la proteína y por el grado de daño que tenga el almidón (mientras mayor es el daño, mayor es la absorción). Al agregar el agua durante el mezclado de la masa, se asegura la distribución adecuada de todos los ingredientes para que el desarrollo de la masa sea el mejor (Pomeranz, 1991).

Grasas: Se añade para mejorar la manejabilidad de la masa y es utilizada para incrementar la retención de gas, el volumen y la suavidad del pan (Mondal, 2008). Al aumentar la cantidad de grasa en la formulación el tamaño del pan puede aumentar hasta el punto en el cual si se sigue aumentando ya no será significativo el crecimiento. La cantidad puede variar dependiendo del tipo de harina que es utilizada, con harinas integrales se requiere de 2 a 3 veces más la cantidad de grasa (Cauvain *et al.*, 2001).

JUSTIFICACIÓN

2. JUSTIFICACIÓN

Los productos de panificación tradicionalmente son elaborados con harina de trigo suave, debido a que, dentro de su composición química, contienen una alta concentración de proteínas que al ser mezcladas con agua forman una red de proteínas llamada gluten, lo cual permite formar masas con mayor viscoelasticidad. A diferencia de la harina de trigo suave, la harina de trigo duro es utilizada con menor frecuencia en la elaboración de pan, debido a que el gluten que contiene es más resistente y con menos extensibilidad. Sin embargo, este tipo de harina de trigo presenta una mejor capacidad de absorción de agua y una menor retrogradación en los productos elaborados, teniendo una vida de anaquel más larga.

Algunos de los procesos utilizados en la industria de la panificación involucran tratamientos fisicoquímicos (térmicos, alcalinos, etc.) de las materias primas. La aplicación de tratamientos térmicos y/o alcalinos en cereales, ocasiona cambios en la disponibilidad y estructura del almidón, así como en las proteínas. Una de las aplicaciones del tostado en cereales es el pan elaborado a partir de trigo duro tostado, el cual está en la lista de alimentos típicos de Italia, producidos por una mezcla de harina de trigo suave y harina de trigo duro. Las características que aporta el trigo duro a los productos elaborados con este, pueden ser una alternativa para la elaboración de pan y productos de panificación.

Por lo que el presente trabajo tiene por objetivo elaborar pan de caja utilizando mezclas de harina de trigo suave y trigo duro sometido a un proceso térmico-alcalino que permita obtener pan de caja con características fisicoquímicas similares a los obtenidos tradicionalmente.

HIPÓTESIS

3. HIPÓTESIS

La mezcla de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometida a un proceso térmico-alkalino permitirá obtener pan de caja con características fisicoquímicas similares a los elaborados tradicionalmente.

OBJETIVOS

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Elaborar pan de caja a partir de mezclas de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometidas a un proceso térmico-alkalino.

4.2. Objetivos específicos

- Obtener una formulación control de la masa para pan de caja.
- Elaborar masas con diferentes concentraciones de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometido a un proceso térmico-alkalino.
- Caracterizar las masas con diferentes concentraciones de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometido a un proceso térmico-alkalino.
- Estandarizar las condiciones de horneado de las masas elaboradas con diferentes concentraciones de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometido a un proceso térmico-alkalino.
- Caracterizar las propiedades físicas (volumen específico y color) y texturales del pan de caja obtenido a partir de las masas elaboradas con diferentes concentraciones de harina de trigo suave y harina de trigo duro sometido a un proceso térmico-alkalino.

MATERIALES Y MÉTODOS

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

Trigo duro (contenido de humedad 12.7%, proteína 13.5%) proporcionado por Molinos Bunge de México S.A de C.V. (Toluca, Estado de México). Mantequilla sin sal marca Iberia, azúcar estándar marca Ingenio San Miguelito, leche entera en polvo marca Nido, agua purificada marca Ciel, sal de mesa marca La Fina, levadura instantánea seca (*Saccharomyces cerevisiae*) marca Nevada, SAFMEX S.A de C.V/ FERMEX S.A. de C.V. Todos los ingredientes fueron adquiridos en un supermercado en Toluca, Estado de México.

5.2. Métodos

5.2.1. Tostado de trigo duro

Se colocaron 2 kg de trigo duro en charolas de aluminio y se introdujeron a un horno de convección estática marca San-Son modelo HCX II (Querétaro, México) precalentado, para ser tostado a 280 °C durante 1,2 y 4 min. Una vez transcurrido el tiempo de tostado, el trigo duro se dejó enfriar hasta llegar a temperatura ambiente y se colocó en bolsas de plástico a prueba de agua para su almacenamiento hasta su utilización.

5.2.2. Nixtamalización

Se prepararon soluciones utilizando 2 kg de trigo de cada uno de los tiempos de tostado, 4 L de agua y 20 g de hidróxido de calcio (1.0% p/p) en una olla de aluminio para ser cocinados a una temperatura de 95 °C durante 30 min, dejando la solución en reposo por 15 h. El trigo duro fue separado del nejayote (solución alcalina) y enjuagado 3 veces utilizando agua purificada para ser secado al sol. Finalmente, las diferentes muestras de trigo duro tostado-nixtamalizado fueron molidas utilizando un molino para café marca Krups modelo GX410011 (Grupo SEB, Selongey, Francia). La harina obtenida se colocó en bolsas de plástico a prueba de agua para su almacenamiento.

5.2.3. Caracterización de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado

5.2.3.1. Microscopia electrónica de barrido

Las muestras fueron montadas en pequeños barriles de aluminio utilizando cinta adhesiva de doble cara de carbono y se observaron utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6510LV (Akishima, Japón) a un voltaje de aceleración de 5kV. Las muestras fueron recubiertas con aproximadamente 20 nm de oro usando un equipo Denton Vacuum DESK IV. Se obtuvieron micrografías con aumentos de 1000x.

5.2.3.2. Difracción de rayos X

Se obtuvieron patrones de difracción de rayos X con un equipo Bruker AXS modelo D8 Advance (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Alemania) acoplado a un tubo con ánodo de cobre. Se utilizó un filtro de níquel con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.543 \text{ \AA}$) y una barra monocromática secundaria de grafito que se hizo funcionar con una densidad de corriente de 35 kV y una diferencia de potencia de 25 mA. Las intensidades se midieron en el intervalo de $5\text{-}50^\circ 2\theta$ con un tamaño de paso de 0.01° y tiempo de 0.6 s por punto.

5.2.3.3. Espectroscopia de infrarrojo

Se realizaron medidas de espectroscopia de infrarrojo utilizando un equipo Perkin Elmer modelo Spectrum 100 (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA) equipado con un accesorio universal ATR de cristal de diamante. Se utilizó un blanco como referencia con el accesorio vacío y un espectro de agua fue sustraído de todas las muestras para remover los efectos de distorsión en la región de $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$. Los espectros de infrarrojo fueron realizados a partir de un promedio de 32 escaneos a una resolución de 1 cm^{-1} y una velocidad de escaneo de 0.4 cm s^{-1} , utilizando una línea base de corrección a una longitud de $1200 \text{ a } 400 \text{ cm}^{-1}$.

5.2.4. Preparación de masas para pan de caja

Se prepararon 5 diferentes formulaciones de las masas para pan de caja (una formulación control y cuatro con diferentes concentraciones de harina de trigo duro

tostado-nixtamalizado). Las masas se prepararon en una batidora marca KitchenAid modelo Pro 500 (Whirlpool México S.A. de C.V., Ciudad de México, México) mezclando los ingredientes secos a una velocidad baja durante 3 min y posteriormente agregando agua. Por último, la sal fue agregada manteniendo una velocidad media durante 1 min a temperatura ambiente. Los ingredientes que fueron utilizados en las formulaciones de las masas para pan de caja se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ingredientes para la formulación de las masas para pan de caja.

Ingredientes	Porcentaje (%)	Cantidad (g)
Harina	100	200
Agua	60	120
Leche en polvo	3.4	6.8
Mantequilla	3.0	6.0
Azúcar	2.5	5.0
Levadura	1.7	3.4
Sal	0.5	1.0

NOTA: Los porcentajes de cada ingrediente son con base al contenido de harina.

La harina de trigo duro tostado-nixtamalizado utilizada en las formulaciones de las masas fue la de 2 min de tostado, debido a que presentó características fisicoquímicas mejores con respecto a las de 1 y 4 min. Las concentraciones utilizadas de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado fueron de 5.0%, 10.0%, 15.0% y 20.0% con respecto a la harina de trigo suave.

5.2.4.1. Imágenes ópticas

Se utilizó un microscopio óptico marca Motic modelo BA400 (Motic, Columbia, Británica, Canadá) para obtener imágenes utilizando una cámara digital Moticom modelo 10 acoplada al microscopio. Las muestras fueron colocadas en portaobjetos de visualización sobre el cual se colocó un cubreobjetos. El software asociado con la cámara Motic Image 2.0 fue utilizado para procesar las imágenes

de las muestras. Las micrografías seleccionadas fueron tomadas utilizando un objetivo de 100x.

5.2.4.2. Volumen de fermentación

Se colocaron 10 g de cada muestra en una probeta graduada y se midió la generación de CO₂ mediante la variación del volumen de cada una de las masas, indirectamente como resultado de la fermentación. El cambio de volumen fue medido 90 min después de la preparación de las masas y el resultado fue presentado en función del cambio relativo en el porcentaje con respecto al volumen inicial.

5.2.5. Horneado de las masas

Las diferentes formulaciones de las masas para pan de caja (200 g) fueron colocados en moldes de aluminio e introducidos en un horno de convección marca San-Son modelo HCX II (Querétaro, México) precalentado y fueron horneadas a 220 °C durante 25 min, manteniendo el contenido de humedad del 10%.

Los recipientes de aluminio fueron retirados del horno y se dejaron enfriar por 15 min. El pan fue retirado de los recipientes, se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se colocó en bolsas de plástico a prueba de agua, hasta el momento de realizar los análisis. Las condiciones de almacenamiento fueron de 4 °C y una humedad relativa de 25%.

5.2.6. Volumen específico del pan de caja

Se evaluó de acuerdo al método 10-05 de la AACC (2000) (10-05.01) con ligeras modificaciones, propuesto por Lainez (2006). El volumen se determinó por desplazamiento de semillas de linaza que fueron colocadas en un cilindro de PVC vacío de 11.5 cm de diámetro y 90 cm de altura, marcando la altura alcanzada. Posteriormente el tubo se vació y se colocaron las semillas en otro recipiente. El pan se colocó en el tubo y nuevamente se vertieron todas las semillas al cilindro de PVC. Se midió el desplazamiento de las semillas a partir de la marca trazada

anteriormente. El volumen específico de las diferentes formulaciones del pan de caja se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$V = (\pi r^2 D)/P \quad (1)$$

donde V = volumen del pan de caja (cm³/g), r = radio del recipiente cilíndrico (cm), D = distancia desplazada desde la marca (cm) y P = peso del pan (g).

5.2.7. Análisis de color del pan de caja

Para la medición del color en la corteza, se siguió el método 14-22 (AACC International, 2000) utilizando un colorímetro marca Konika Minolta Chroma Meter modelo CR-410 (Konika Minolta Sensing Inc., Tokio, Japón). Los parámetros de color obtenidos fueron L*, a* y b*, que corresponden a medidas de luminosidad, rojo/verde y amarillo/azul, respectivamente. Anterior a cada medición se realizó la calibración del equipo, con ayuda de una placa de calibración blanca (blanco L* = 97.63, a* = 0.78 y b* = 0.25). Se realizaron 3 mediciones de color en diferentes zonas de cada una de las diferentes formulaciones del pan de caja.

5.2.8. Perfil de textura del pan de caja

Se realizó un análisis de perfil de textura (TPA) utilizando un texturómetro marca Brookfield, modelo CT3-4500 (Massachusetts, E.U.) equipado con una sonda cilíndrica (TA4/1000, D = 38.1 mm, L = 20 mm). Los panes de caja se comprimieron hasta 40% de su altura original. Los análisis de textura se realizaron 2 horas después del horneado.

Se aplicaron dos ciclos utilizando una carga de disparo de 10 g y una velocidad de ensayo de 1 mm/s. Los siguientes parámetros se cuantificaron y se definen como (Trinh & Glasgow, 2012): dureza (la fuerza máxima absoluta en la primera compresión), adhesividad (área de fuerza negativa para el primer ciclo, lo que representa el trabajo necesario para tirar del émbolo de compresión lejos de la muestra), resiliencia (relación entre las áreas bajo las curvas de compresión y

descompresión), cohesividad (relación del área de fuerza positiva durante la segunda compresión que se da durante la primera compresión), elasticidad (altura que la muestra recupera durante el tiempo que transcurre entre el final del primer ciclo y el inicio del segundo ciclo) y la masticabilidad (dureza x cohesividad x elasticidad). Estos parámetros fueron obtenidos al analizar las curvas obtenidas por el software del equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Caracterización de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado

6.1.1. Microscopia electrónica de barrido

La Figura 1 presenta imágenes de microscopia electrónica de barrido del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional.

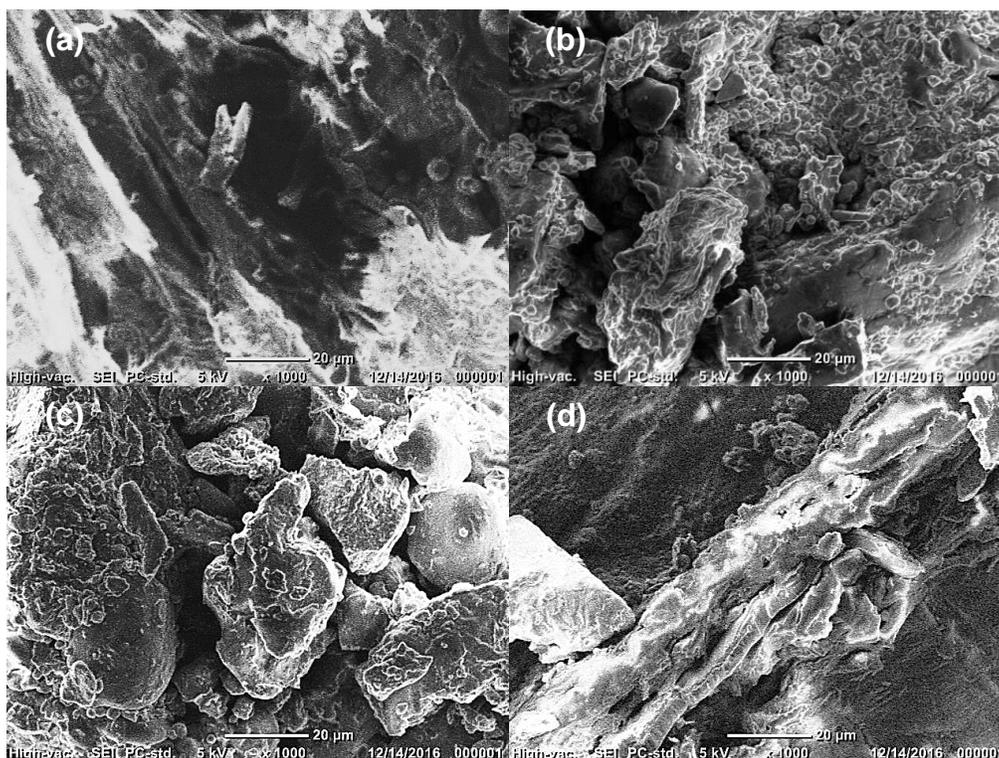


Figura 1. Microestructura de las diferentes muestras: (a) trigo duro, (b) trigo duro tostado-nixtamalizado (1 min), (c) trigo duro tostado nixtamalizado (2 min) y (d) trigo duro tostado nixtamalizado (4 min).

En la imagen del trigo duro (Figura 1a) podemos observar pequeños gránulos de almidón dispersos y aglomeraciones de las proteínas presentes en la harina. A medida que el tiempo de tostado aumenta, los gránulos de almidón comienzan a agruparse interactuando con las proteínas formando redes estructurales de complejos lípidos-amilosa (Figura 1b y 1c). Cuando el tiempo de tostado es alto (4

min) la morfología de los gránulos de almidón y las proteínas se ven afectadas mostrando una apariencia disgregada y fragmentada en forma de pasta, debido a la lixiviación de la amilosa presente en los gránulos de almidón de la harina de trigo duro (Figura 1d) (Chen *et al.*, 2015). Qiu *et al.* (2015) estudiaron las diferencias en las propiedades fisicoquímicas, morfológicas y estructurales entre el almidón y la harina de arroz modificado mediante un tratamiento térmico y encontraron que la estructura de la harina presentó agregaciones, tamaños irregulares y formas diferentes de los gránulos de almidón que interactúan con las proteínas formando una estructura no homogénea. Por lo tanto, el proceso térmico alcalino aplicado en este trabajo tiene un efecto en las propiedades fisicoquímicas del trigo.

6.1.2. Difracción de Rayos X

En la Figura 2 podemos observar los patrones de difracción del trigo duro y del trigo duro tostado sometido a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional.

A menudo los cereales exhiben una estructura cristalina tipo A debido a la presencia de picos característicos a 15° , 17° , 18° y 23° (2θ) como el caso del trigo duro (Santiago-Ramos *et al.*, 2017). Al someter la harina de trigo a un proceso térmico (tostado), la cristalinidad de la harina de trigo duro cambia a tipo V debido a la aparición de un pico a 20° (2θ) característico de la formación de complejos lípido-amilosa (Martínez *et al.* 2015). Conforme se aumenta el tiempo de tostado en el trigo duro la definición de los picos disminuye indicando que la estructura cristalina original comienza a cambiar produciendo una estructura altamente amorfa.

El cambio en la cristalinidad del trigo duro tostado-nixtamalizado con respecto al trigo duro se utilizó para cuantificar el incremento o decremento en la cristalinidad a los diferentes tiempos de tostado y se define como (Carrillo-Navas *et al.*, 2013):

$$CI(\%) = \frac{\int_{2\theta_{\min}}^{2\theta_{\max}} I^{TDN_x}(2\theta)d(2\theta) - \int_{2\theta_{\min}}^{2\theta_{\max}} I^{TD}(2\theta)d(2\theta)}{\int_{2\theta_{\min}}^{2\theta_{\max}} I^{TDN_x}(2\theta)d(2\theta)} \times 100 \quad (1)$$

donde I^{TDN_x} y I^{TD} respectivamente, son las intensidades del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional en el rango de difracción de $5-50^\circ$ (2θ). Los resultados mostraron que, al aumentar el tiempo de tostado, la cristalinidad aumentó, llegando a un incremento máximo en la cristalinidad de 5.07% a un tiempo de 2 min, sin embargo; cuando el tiempo de tostado fue de 4 min la cristalinidad disminuyó en un 7.08%, confirmando lo observado en la Figura 1.

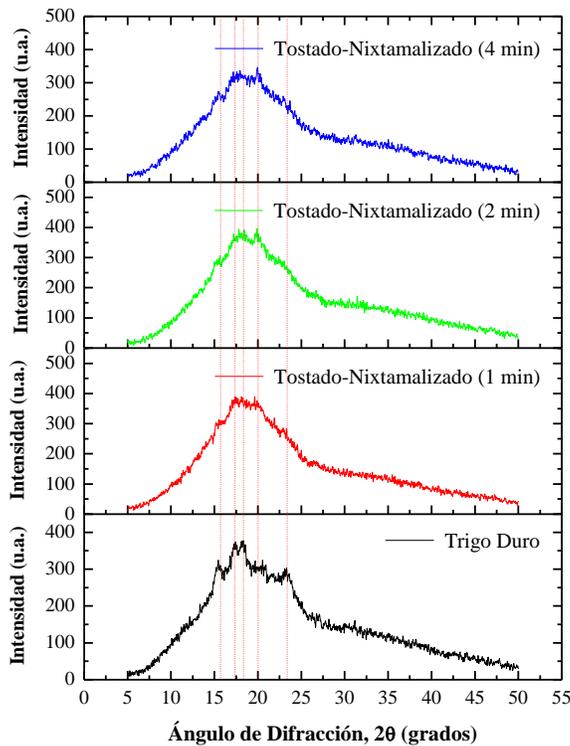


Figura 2. Patrones de difracción del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional.

6.1.3. Espectroscopia de Infrarrojo

Los espectros de infrarrojo del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional se exhiben en la Figura 3.

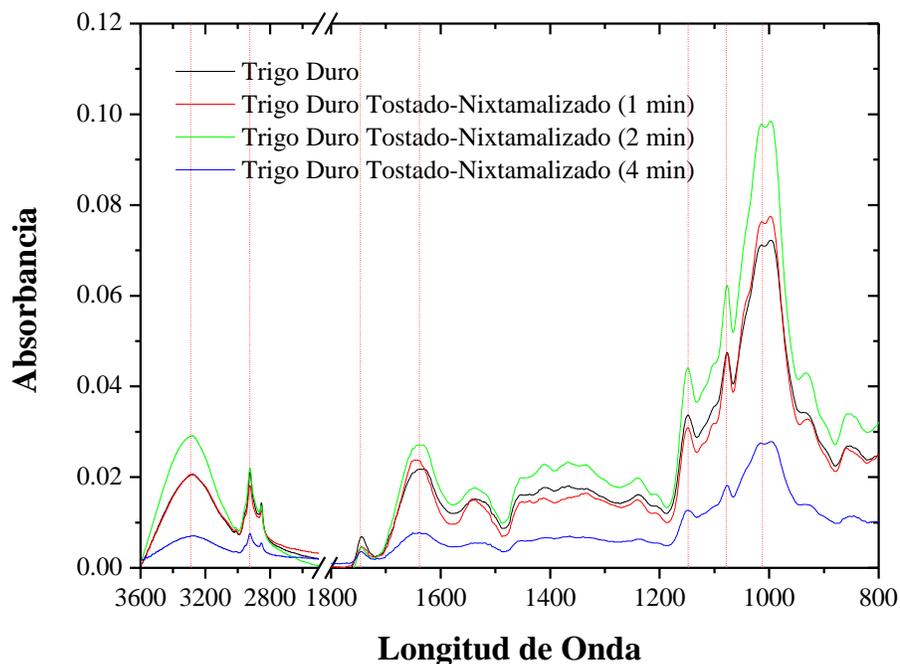


Figura 3. Espectros de infrarrojo del trigo duro y del trigo duro tostado a diferentes tiempos y posteriormente sometido a un proceso de nixtamalización tradicional.

La presencia de bandas de intensidad en el rango de $800\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ pueden ser relacionadas a las interacciones de los grupos funcionales C-O, C-C- y C-H, que son características de la estructura del almidón e influenciadas por la distribución del tamaño de sus gránulos. La absorbancia en la longitud de 1022 cm^{-1} está relacionada con las vibraciones de los componentes amorfos y con la disminución en la cristalinidad del almidón, mientras que la longitud de 1047 cm^{-1} muestra el grado de ordenamiento (cristalinidad) de las moléculas de almidón (van Soest *et al.*, 1995). La relación en la intensidad de las bandas $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ ha sido utilizada como un índice de estimación del grado de ordenamiento molecular del almidón. En la Figura 3 podemos notar que a medida que se aumenta el tiempo de

tostado en el trigo duro, la intensidad del pico a 1022 cm^{-1} se incrementa y la intensidad del pico a 1047 cm^{-1} disminuye, indicando que la estructura del almidón es menos cristalina. Los resultados obtenidos en los espectros de infrarrojo están directamente relacionados con los estudios de rayos X realizados a las muestras.

Las bandas de absorbancia en la región de $1600\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ son atribuidas a enlaces C=O y C-N correspondientes a grupos amida I, que son los componentes estructurales de las proteínas secundarias. En esta región, la diferencia en la intensidad de los picos cambia dependiendo del contenido de proteínas, por lo tanto, a mayor intensidad podemos observar una mayor presencia de gliadinas y gluteninas. La mayor intensidad mostrada en la longitud de onda de 1640 cm^{-1} fue a un tiempo de tostado de 2 min, mientras que a un tiempo de tostado de 4 min la intensidad de los grupos amida I disminuyó, esto quiere decir que la cantidad de gliadinas y gluteninas disminuyó (Marti *et al.*, 2016).

Los picos presentes en el espectro de infrarrojo a 1750 cm^{-1} y 2950 cm^{-1} están asociados con grupos CH_2 y CH_3 presentes en los lípidos y por lo tanto en los complejos lípido-amilosa. A un tiempo de 2 min de tostado del trigo duro la intensidad en esos picos fue mayor, predominando la formación de los complejos lípido-amilosa. La región de $3000\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ está altamente relacionada con el contenido de humedad de la muestra (grupos OH) (Chen *et al.*, 2017).

6.2. Imágenes ópticas de las masas

La Figura 4 muestra las imágenes ópticas de la masa formulada con harina de trigo suave (control) y las masas formuladas con diferentes concentraciones de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado. En la imagen de la masa formulada con harina de trigo suave (Figura 4a) podemos observar gránulos de almidón de trigo y pequeñas estructuras elípticas que pueden ser atribuidas a la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) agregada durante el proceso de formulación (Dai *et al.*, 2017). La Figura 4b muestra la imagen de la masa formulada con 5.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado y podemos notar que los gránulos de

almidón presentaron una disminución en su tamaño debido al proceso de gelatinización que ocurre durante el tratamiento térmico-alcalino, además de fibras de trigo duro y fracciones de proteínas contenidas en la harina. En la Figura 4c, 4d y 4e podemos observar las masas formuladas con 10%, 15% y 20% de harina de trigo duro tostado nixtamalizado, respectivamente, identificando la presencia de fibras de trigo duro, pequeñas cantidades de gránulos de almidón de trigo lixiviados y aglomerados de las proteínas.

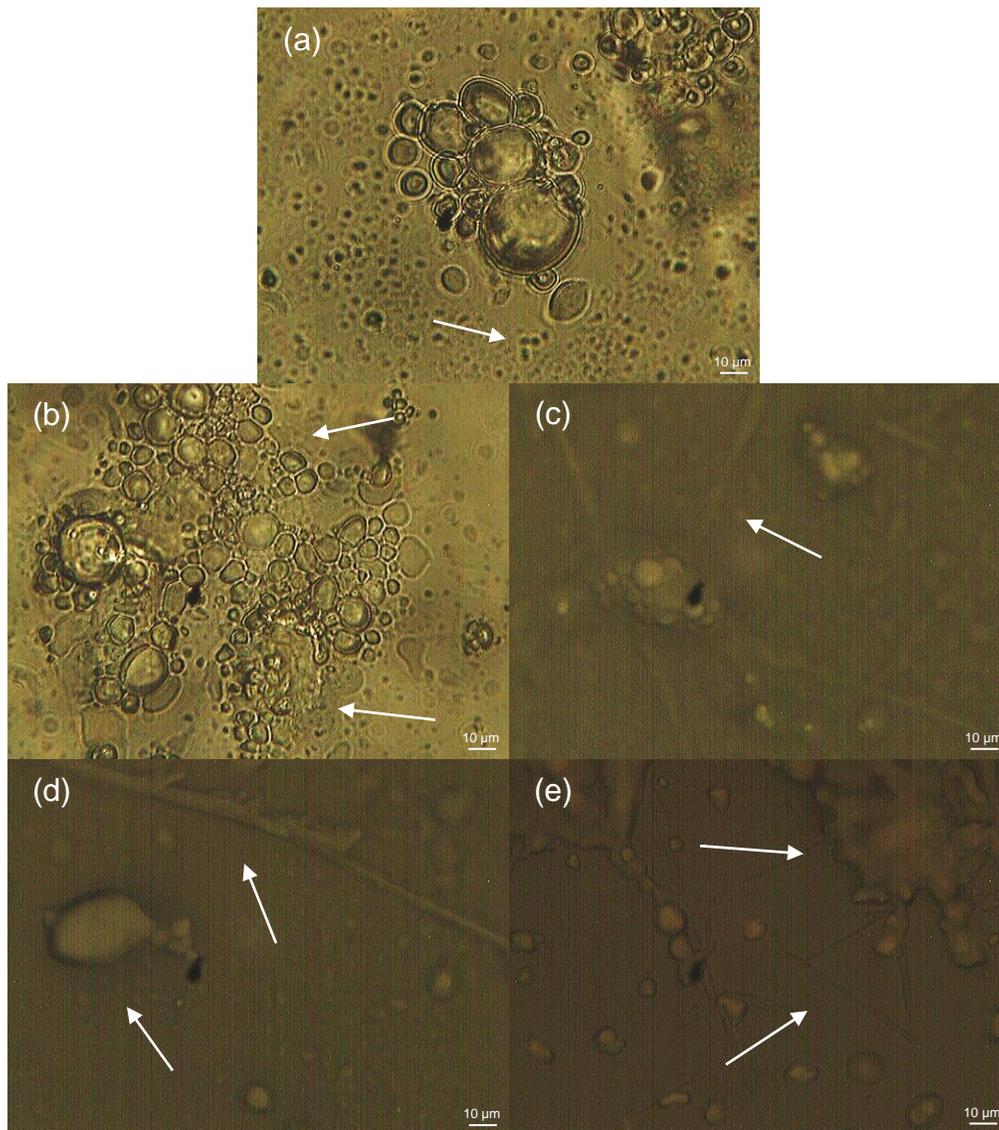


Figura 4. Imágenes ópticas de las masas formuladas: (a) control, (b) 5.0%, (c) 10.0%, (d) 15.0% y (e) 20.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado.

6.3. Volumen de fermentación de las masas

La producción de CO₂ debido a la actividad de la levadura, provoca cambios en la microestructura de las masas formuladas y puede estar relacionada con la disponibilidad de mono y disacáridos fermentables, así como aminoácidos, siendo la fermentación un paso importante para la obtención de pan de caja con propiedades fisicoquímicas deseadas (Verheyen *et al.*, 2014; 2015). Por lo tanto, el cambio de volumen de las masas, manteniendo constante la cantidad de levadura agregada, puede ser un indicador de la capacidad de extensión de la masa en relación con el tipo de harina de trigo utilizada (Martínez & Gómez, 2017).

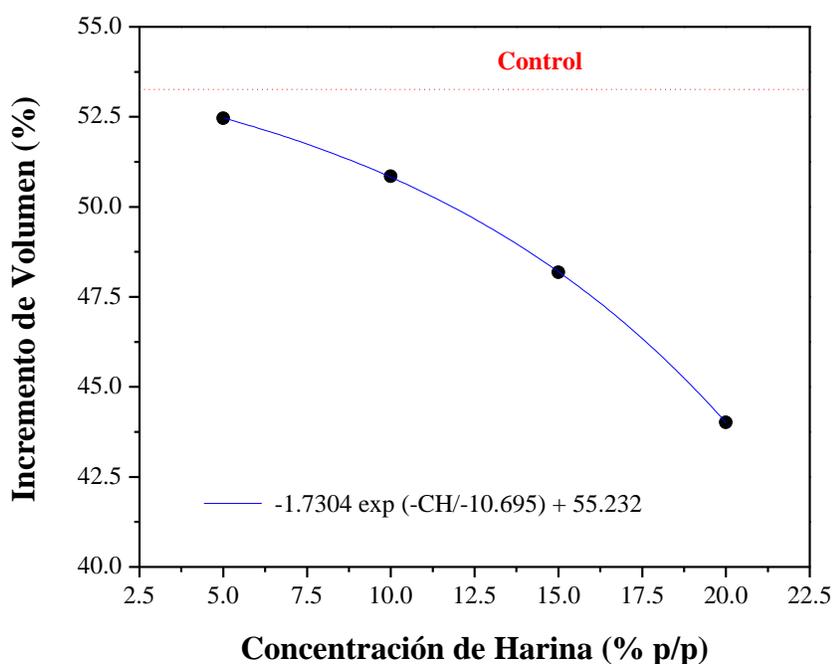


Figura 5. Incremento de volumen (%) de las masas formuladas con harina de trigo suave (control) y con diferentes concentraciones de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado.

El incremento de volumen para la masa formulada con 5.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado fue de 52.46%, disminuyendo monótonamente cuando la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado aumentó (Figura 5), debido a la agregación de la fibra del trigo duro tostado-nixtamalizado que

presenta interferencias en la formación de la red de gluten de las masas formuladas (Baiano *et al.*, 2009).

El incremento del volumen (*IV*) en función de la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado (*CH*) puede ser descrito por una función de decaimiento exponencial $IV = -1.7304 \exp(-CH/-10.695) + 55.232$. Esto muestra que el volumen mínimo que puede alcanzar la masa utilizando harina de trigo duro tostado-nixtamalizado sería de 26.63%. En la Figura 5 podemos observar que el incremento de volumen para la masa formulada con harina de trigo suave (control) fue de 53.50%.

6.4. Volumen específico del pan de caja

En la Tabla 2 podemos observar los valores del volumen específico del pan de caja. El volumen específico del pan de caja disminuyó conforme la cantidad de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado aumentó. Esto puede ser atribuido al aumento de la concentración de fibra del trigo duro tostado-nixtamalizado que no permite buena interacción entre la fibra y la red de gluten, ya que provoca la disminución de la retención de gas (Gómez *et al.*, 2003).

Tabla 2. Volumen específico de las diferentes formulaciones del pan de caja.

Muestra	Volumen específico (cm ³ /g)
Control	167.55
5.0%	154.13
10.0%	152.79
15.0%	134.86
20.0%	123.96

En general, los panes obtenidos de las masas con consistencia más baja alcanzaron volúmenes específicos más bajos, mientras que las masas más consistentes dieron lugar a panes con volúmenes específicos más altos. En la

Figura 6 podemos observar la tendencia del volumen específico de las diferentes formulaciones del pan de caja.

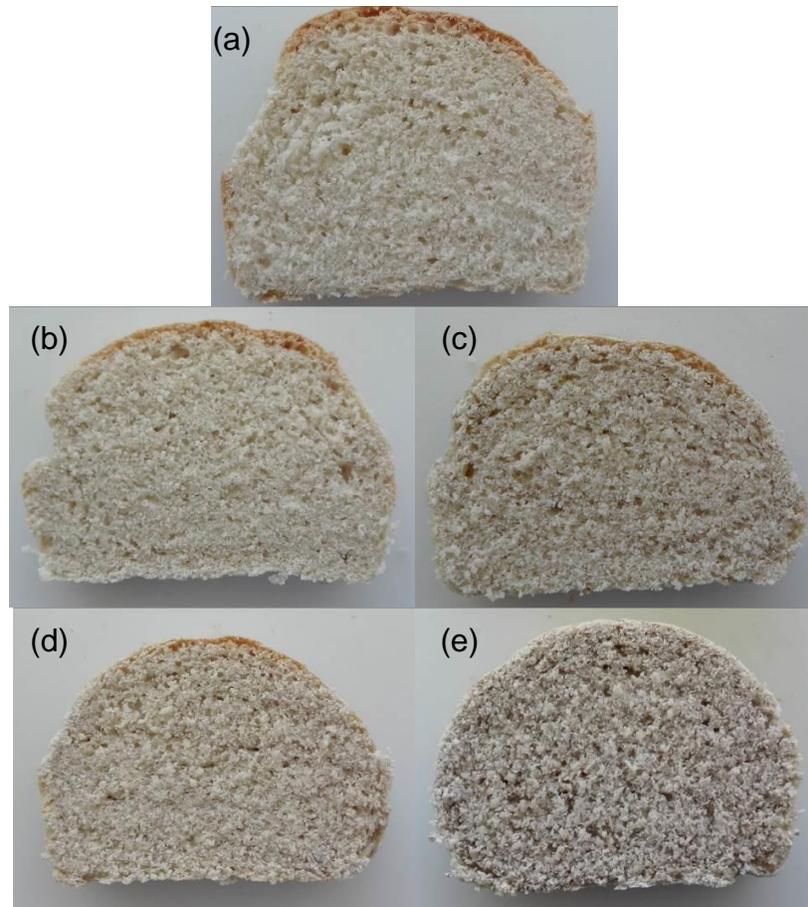


Figura 6. Imágenes ópticas del pan de caja formulado: (a) control, (b) 5.0%, (c) 10.0%, (d) 15.0% y (e) 20.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado.

Rubel *et al.* (2015) formularon pan de caja enriquecido con fibra y encontraron que la disminución del volumen específico del pan se debió a la adición de fibra soluble que deteriora la retención de gas (debido a la interacción con la red de gluten). Resultados similares fueron reportados por Korus *et al.* (2006) encontrando que la adición de fibra soluble en el pan de caja presentó volúmenes específicos más bajos. Por otro lado, la fibra tiene la capacidad de retener agua lo cual incrementa la densidad de la miga evitando la retención suficiente de gas que se produce durante la fermentación teniendo como resultado un pan con menor volumen (Gómez *et. al*, 2003).

6.5. Análisis de color del pan de caja

El color de los panes es considerado como un factor muy importante en la comercialización y está directamente influenciado por los ingredientes utilizados para su formulación y las condiciones de horneado (Alencar *et al.*, 2015). En la Tabla 3 se muestran los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) obtenidos del pan de caja. El pan de caja formulado con harina de trigo suave (control) presentó un valor de Luminosidad (L^*) menor con respecto a las demás formulaciones, es decir, el pan de caja formulado con 20.0% de harina de trigo tostado-nixtamalizado presentó un valor de Luminosidad mayor. De acuerdo a Granato & Masson (2010) el valor de L^* es sólo una medida aproximada de la Luminosidad, la cual se puede considerar como un miembro de la escala de grises, entre blanco y negro.

El valor de a^* para todos los panes de caja formulados fue positivo, es decir, las formulaciones presentaron matices de color rojo. El valor mayor de a^* fue exhibido por la formulación con harina de trigo suave (control), mientras que la formulación con 20% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado presentó un valor de a^* menor. Todas las formulaciones de pan de caja presentaron valores de b^* positivos, lo que quiere decir que presentaron tonos amarillos. El valor mayor de b^* se presentó en la formulación con harina de trigo suave (control) y disminuyó cuando aumentó la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado, ya que existe menor disponibilidad de carbohidratos disminuyen las reacciones de Maillard cuando el color amarillento es menor.

Tabla 3. Parámetros de color de las diferentes formulaciones de pan de caja.

Muestra	L^*	a^*	b^*
Control	59.63	10.10	34.24
5.0%	63.09	9.48	33.41
10.0%	66.56	7.22	31.81
15.0%	70.10	4.67	29.66
20.0%	70.93	4.52	26.13

Baiano *et al.* (2009) formularon pan de caja utilizando diferentes concentraciones de trigo duro tostado, encontrando resultados similares a los descrito en este trabajo en los parámetros de color y explicaron que los valores de la Luminosidad (L*) fueron afectados debido al tostado del trigo duro.

6.6. Perfil de textura del pan de caja

La dureza del pan de caja es el atributo de la textura que ha atraído mayor atención en la estimación de la calidad de los productos de panificación, debido a que el consumidor los asocia con la percepción sensorial de frescura y con la esponjosidad (Ordoñez & Osorio, 2013). La Tabla 4 muestra el análisis de textura de los panes de caja formulados.

Tabla 4. Análisis de perfil de textura de las diferentes formulaciones de pan de caja.

Muestra	Dureza (g)	Adhesividad (mJ)	Resiliencia	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Gomosidad (g)	Masticabilidad (mJ)
Control	1766.00	1.04	0.35	0.99	26.51	3488.70	133.91
5.0%	2430.00	1.31	0.33	0.93	24.01	2613.00	225.51
10.0%	3441.00	2.02	0.28	0.90	22.59	2084.35	483.35
15.0%	3421.00	3.43	0.19	0.87	19.53	1587.54	553.21
20.0%	3619.00	4.20	0.10	0.83	15.76	1183.90	607.79

Los parámetros de dureza, adhesividad y masticabilidad aumentaron a medida que la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado aumentó, debido a que la microestructura fue más compacta. La adición de fibra también tiene un efecto sobre la dureza del pan de caja elaborado, esto relacionado al engrosamiento de las paredes que rodean las burbujas de aire en la miga, así como la absorción de agua que hay durante el proceso de amasado lo cual afecta la extensibilidad de la masa obteniendo un pan con menor volumen y mayor

dureza (Gómez *et. al*, 2003). Los parámetros de resiliencia, cohesividad, elasticidad y gomosidad disminuyeron a medida que aumentó la concentración de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado, debido a que la microestructura se resiste a la ruptura al instante, necesitando esfuerzos mecánicos más fuertes. Sissons (2008) menciona que comúnmente el trigo duro presenta una baja actividad de α -amilasa provocando que la masa no se desarrolle de manera apropiada generando un pan más duro, teniendo efectos directos sobre la textura final del pan de caja.

Besbes *et al.* (2014) investigaron el impacto de las condiciones de horneado sobre las cinéticas de retrogradación y las propiedades mecánicas del pan de caja, concluyendo que el aumento o disminución de la dureza en el pan está relacionada con la porosidad del pan y el tamaño de la burbuja. Cuando menor fue la porosidad y el tamaño de la burbuja del pan de caja, mayor fue la dureza.

Cabe mencionar que las harinas destinadas para la preparación de masas forman una red de gluten firme además de que el almidón tiene un efecto importante en esa firmeza debido a su capacidad de hinchamiento, entre mayor sea el hinchamiento del almidón, mayor capacidad de agua se lleva a cabo durante el proceso de horneado lo cual permite la formación de una textura suave. Sin embargo, las harinas sometidas a tratamientos térmico-alcálinos presentan diferentes características de textura, por lo tanto, diferente comportamiento durante el proceso de horneado afectando los parámetros de textura. (Rashidi *et. al*, 2016).

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo demostraron que la aplicación de tratamientos térmicos-alcálinos sobre el grano de trigo duro provocó la pérdida de la cristalinidad de la estructura del almidón, modificación en la estructura de las proteínas (gliadinas y gluteninas) y la formación de complejos lípido-amilosa que tienen efectos sobre la retrogradación del pan, favoreciendo el contenido de proteínas a un tiempo de 2 min de tostado, a diferencia de un tiempo de 4 min en donde la cantidad de proteínas disminuye.

El contenido de proteínas para la formación de la red de gluten es muy importante durante la formulación del pan de caja, ya que tiene un efecto directo con la fermentación. El trigo duro al tener poco contenido de estas proteínas formadoras de gluten (gliadinas y gluteninas) afecta las propiedades viscoelásticas de la masa, es por esto que al aumentar la cantidad de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado la fermentación de las masas se ve afectada, siendo de menor tamaño el pan con un 20.0% de harina de trigo duro tostado-nixtamalizado. Por otra parte, el contenido de fibra en la harina de trigo duro tostado-nixtamalizado también afecta el volumen específico del pan de caja, ya que el contenido de fibra soluble en la harina de trigo duro tostado-nixtamalizado es mayor.

El trigo duro brinda una textura diferente al pan de caja formulado con respecto al formulado con harina de trigo suave. El tratamiento térmico-alcálico en conjunto con el tipo de trigo utilizado, aportaron características fisicoquímicas diferentes al pan de caja, aumentando su dureza, adhesividad y masticabilidad, lo que tiene efecto directo en la apariencia del producto terminado y el consumidor pudiera asociar con un producto de mala calidad.

BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

Alencar, N. M. M., Steel, C. J., Alvim, I. D., de Moraes, E. C., & Bolini, H. M. A. (2015). Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2), 1011-1018.

Alldrick A.J., Campden & Hajšelová (2002). The processing of cereal foods. In Henry, C.J.K. Chapman, C. (Eds.). *Nutrition Handbook for Food Processors*. (pp.301-313). Washington, D.C: Woodhead Publishing.

Arendt, Elke K., Zannini, Emanuele. (2013). Cereal Grains for the Food and Beverage Industries. Philadelphia: Woodhead Publishing, (Chapter 1).

Badui D. S. (2013) Química de los Alimentos. (5ª ed.). México: Pearson, (Chapter 2).

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(1), 199-207.

Besbes, E., Jury, V., Monteau, J. Y., & Le Bail, A. (2014). Effect of baking conditions and storage with crust on the moisture profile, local textural properties and staling kinetics of pan bread. *LWT-Food Science and Technology*, 58(2), 658-666.

Brockway Barbara E. (2001). Pasta. In In Dendy A.V.D & Bogdan j. Dobraszczyk (Eds.), *Cereals and Cereal Products* (pp.258-260) Maryland: Aspen Publication.

Cauvain S.P., Campden & Chorleywood Research Association (2001). Breadmaking. In Owens, G. (Ed), *Cereals Processing Technology*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Chen, B., Zeng, S., Zeng, H., Guo, Z., Zhang, Y., & Zheng, B. (2017). Properties of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes formed by high pressure homogenization. *Food Chemistry*, 226, 119-127.

Chen, X., He, X., Fu, X., & Huang, Q. (2015). In vitro digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment. *Journal of Cereal Science*, 63, 109-115.

Dobraszczyk Bogdan J., Grant M. Campbell & Zhilin Gan. (2001). Bread: A Unique Food. In Dendy A.V.D & Bogdan J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereals and Cereal Products* Maryland: Aspen Publication.

Edwards W. P. (2007) *Science of Bakery Products*. Cambridge: RSC Publishing.

Finch, H.J.S. Samuel, A.M. Lane, G.P.F. (2002). Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry - Including Grassland (8th Edition). Cambridge: Woodhead Publishing, (Chapter 12).

Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W. S., Courtin, C. M., Gebruers, K., & Delcour, J. A. (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in food science & technology*, 16(1), 12-30.

Gómez, M., Ronda, F., Blanco, C. A., Caballero, P. A., & Apesteguía, A. (2003). Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food Research and Technology*, 216(1), 51-56.

Granato, D., & Masson, M. L. (2010). Instrumental color and sensory acceptance of soy-based emulsions: a response surface approach. *Food Science and Technology (Campinas)*, 30(4), 1090-1096.

Guillon F., Champ M., Thibault J.F. and Saulnier L. (2011). Dietary fibre functional products. In Saarela, Maria. *Functional Foods - Concept to Product* (2nd Edition). (pp. 582-622). Philadelphia: Woodhead Publishing.

Guzmán, A. Q., Flores, M. E. J., Feria, J. S., Montealvo, M. G. M., & Wang, Y. J. (2011). Rheological and thermal properties of masa as related to changes in corn protein during nixtamalization. *Journal of cereal science*, 53(1), 139-147.

Kenny, S., Wehrle, K., Stanton, C., & Arendt, E. K. (2000). Incorporation of dairy ingredients into wheat bread: effects on dough rheology and bread quality. *European food research and technology*, 210(6), 391-396.

Kent, N.L. & Evers, A.D. (1994). *Technology of Cereals* (4th Edition). Great Britain: Woodhead Publishing.

Korus, J., Grzelak, K., Achremowicz, K., Sabat, R. (2006). Influence of prebiotic additions on the quality of gluten-free bread and on the content of inulin and fructooligosaccharides. *Food Science and Technology International*, 12, 489-495.

Le Bail, P., Bizot, H., Ollivon, M., Keller, G., Bourgaux, C., & Buléon, A. (1999). Monitoring the crystallization of amylose–lipid complexes during maize starch melting by synchrotron x-ray diffraction. *Biopolymers*, 50(1), 99-110.

Marti, A., Bock, J. E., Pagani, M. A., Ismail, B., & Seetharaman, K. (2016). Structural characterization of proteins in wheat flour doughs enriched with

intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) flour. *Food Chemistry*, 194, 994-1002.

Martínez, M. M., & Gómez, M. (2017). Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *Journal of Food Engineering*, 197, 78-86.

Matz Samuel A. (1991). *The Chemistry and Technology of Cereals as Food and Feed* (2nd Ed.). New York: Van Nostrand Reinhold.

Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *CYTA-Journal of Food*, 3(5), 307-313.

Méndez-Montealvo, G., García-Suárez, F. J., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 420-425.

Mondragón, M., Bello-Perez, L. A., Agama, E., Melo, A., Betancur-Ancona, D., & Peña, J. L. (2004). Effect of nixtamalization on the modification of the crystalline structure of maize starch. *Carbohydrate polymers*, 55(4), 411-418.

Nadiha, M. N., Fazilah, A., Bhat, R., & Karim, A. A. (2010). Comparative susceptibilities of sago, potato and corn starches to alkali treatment. *Food chemistry*, 121(4), 1053-1059.

Ordoñez, M. H., & Osorio, D. D. (2013). Características reológicas del pan de agua producto autóctono de Pamplona (Norte de Santander). *Bistua Revista de la Facultad de Ciencias Basicas*, 10(2).

Peña Bautista, R. J., Perez Herrera, P., Villaseñor Mir, E., Gomez Valdez, M. M., & Lozano, M. (2008). *Calidad de la cosecha de trigo en Mexico: Ciclo primavera-verano 2006*. Cimmyt.

Peña, R. J., Ortíz-Monasterio, J. I., & Sayre, K. D. (1998). Estrategias para mejorar (o mantener) la calidad panadera en trigo de alto potencial de rendimiento. Explorando altos rendimientos de trigo, 289-306.

Pomeranz Yeshajahu (1991). *Functional Properties of Food Components* (2nd Ed.). California: Academic Press.

Rashidi, A., HadiNezhad, M., Rajabzadeh, N., Yarmand, M. S., & Nemati, S. (2016). Frozen baguette bread dough II. Textural and sensory characteristics of baked product. *Journal of Cereal Science*, 70, 9-15.

Robles R. Ma. Del Carmen, Areli Flores-Morales, & Rosalva Escobedo (2012) Corn tortillas: Physicochemical, Structural and Functional Changes. In José C. Jiménez López (Ed.), *Maize: Cultivation, Uses and Health Benefits*. New York: Nova Science Publishers.

Rubel, I. A., Pérez, E. E., Manrique, G. D., & Genovese, D. B. (2015). Fibre enrichment of wheat bread with Jerusalem artichoke inulin: Effect on dough rheology and bread quality. *Food Structure*, 3, 21-29.

Santiago-Ramos, D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Véles-Medina, J. J., & Mariscal-Moreno, R. M. (2017). Changes in the thermal and structural properties of maize starch during nixtamalization and tortilla-making processes as affected by grain hardness. *Journal of Cereal Science*, 74, 72-78.

Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*, 2(2), 75-90.

Townsend G.M. (2001). Cookies, Cakes, and Other Flour Confectionery. In Dendy A.V.D & Bogdan J. Dobraszczyk (Eds.), *Cereals and Cereal Products* (pp. 234) Maryland: Aspen Publication.

Trinh, L., Lowe, T., Campbell, G. M., Withers, P. J., & Martin, P. J. (2015). Effect of sugar on bread dough aeration during mixing. *Journal of Food Engineering*, 150, 9-18.

Trinh, K. T., & Glasgow, S. (2012). On the texture profile analysis test Accessed 05.01.16. www.conference.net.au/chemeca2012/papers/202.pdf.

Valderrama-Bravo, C., López-Ramírez, Y., Jiménez-Ambriz, S., Oaxaca-Luna, A., Domínguez-Pacheco, A., Hernández-Aguilar, C., & Moreno-Martínez, E. (2015). Changes in chemical, viscoelastic, and textural properties of nixtamalized dough with nejayote. *LWT-Food Science and Technology*, 61(2), 496-502.

van Soest, J. J., Tournois, H., de Wit, D., & Vliegenthart, J. F. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201-214.

Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M., & Becker, T. (2015). Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. *Food Research International*, 76, 860-866.

Verheyen, C., Jekle, M., & Becker, T. (2014). Effects of *Saccharomyces cerevisiae* on the structural kinetics of wheat dough during fermentation. *LWT-Food Science and Technology*, 58(1), 194-202.

Wang, S., & Copeland, L. (2012). Effect of alkali treatment on structure and function of pea starch granules. *Food chemistry*, 135(3), 1635-1642.

Zhou W. & N. Therdthai (2006) Manufacture. In Y.H. Hui (Ed.), Bakery Products: Science and Technology. (pp. 301) Iowa: Blackwell Publishing.

ANEXOS

9. ANEXOS

9.1 Diagrama de proceso de elaboración de pan de caja

