



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

ELABORACIÓN DE UN PAN LIBRE DE GLUTEN MEDIANTE MASAS ADICIONADAS CON
ALMIDÓN MODIFICADO DE AMARANTO Y WPI

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

PRESENTA:

BETZAIDA ARELI SANTIAGO SANTOS

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

ELEAZAR AGUIRRE MANDUJANO, DR.



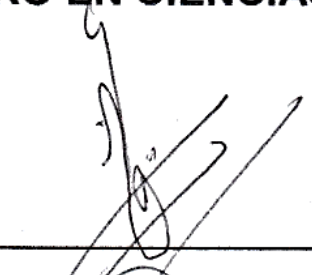
CHAPINGO, MÉXICO, ENERO DE 2018

**ELABORACIÓN DE UN PAN LIBRE DE GLUTEN MEDIANTE MASAS
ADICIONADAS CON ALMIDÓN MODIFICADO DE AMARANTO Y WPI**

Tesis realizada por la C. Betzaida Areli Santiago Santos, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado; ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTOR:



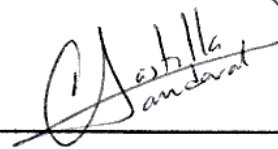
Dr. Eleazar Aguirre Mandujano

COORDIRECTOR:



Dr. César Ramírez Santiago

ASESOR:



Dra. Ofelia Sandoval Castilla

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por hacer posible la realización de mis estudios de posgrado.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, por prepararme profesionalmente, por permitirme alcanzar mis metas y por brindarme un hogar.

A los profesores y personal del **Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria** por los conocimientos adquiridos en este par de años y el apoyo brindado.

A mi comité asesor, Dr. Eleazar Aguirre Mandujano, Dra Ofelia Sandoval y Dr. César Ramírez y por guiarme durante este proceso, por el apoyo, sus consejos, el tiempo dedicados y por compartir sus conocimientos.

DEDICATORIAS

A mi familia, por el cariño, apoyo y la motivación que me han brindado siempre, a mi madre por su optimismo y alegría que nunca le falta, a mi padre por su perseverancia y por enseñarme a no rendirme nunca y que todo se puede lograr, a mis hermanos que cada uno a su manera siempre me han mostrado su apoyo. A mi tío Francisco y mi prima Rosario que nunca me ha dejado sola y me motivan siempre a seguir, y a mis abuelos Guadalupe y Francisco de quienes siempre he tenido cariño y motivación para seguir.

Y a mis amigos especialmente a Gaby, Isaac, Vicente, Fernando, Enrique, Citlali, Chrisha y Laura, quienes siempre han estado conmigo y me han ayudado en los momentos difíciles, gracias por dedicarme un poco de su tiempo, sus consejos y por levantarme siempre el ánimo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Esta tesis fue realizada por Betzaida Areli Santiago Santos, es originaria de Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, nació el 28 de noviembre de 1989. Realizó su educación media superior en el Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicio 183, sus estudios de licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo, egresada del Departamento de Ingeniería Agroindustrial en el año 2013.

En el ámbito profesional trabajó en el Proyecto Estratégico de Seguridad Alimentaria, en el municipio de Pungarabato Guerrero durante el periodo 2013-2014.

En agosto de 2015 ingresó al Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de maestría.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN GENERAL.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	3
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Capítulos de tesis	5
1.5 Literatura citada.....	7
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 El Pan.....	9
2.1.1 Función de los ingredientes en el pan	9
2.2 Formación y estabilización de la masa de pan	16
2.2.1 Las proteínas en la formación de espuma	17
2.3 Calidad del pan.....	19

2.3.1 Textura.....	20
2.3.2 Sabor del pan	22
2.3.3 Envejecimiento del pan	23
2.4 intolerancia al gluten.....	23
2.5 El almidón.....	25
2.5.1 Almidón nativo.....	26
2.5.2 Estructura química del almidón	26
2.5.3 Cambios estructurales en el gránulo de almidón	31
2.5.4 Modificaciones del almidón.....	33
2.6 Amaranto	38
2.6.1 Identificación y descripción de la planta	40
2.6.2 Composición química	40
2.6.3 Propiedades del amaranto	42
2.6.4 Principales estados productores en México.....	42
2.7 Antecedentes de la investigación	43
2.8 Revisión de literatura.....	45
RESUMEN.....	55
ABSTRACT	56
CAPÍTULO 3: EFECTO DE LA ACETILACIÓN SOBRE LA FUNCIONALIDAD DE ALMIDÓN DE AMARANTO PARA USOS EN ALIMENTOS	57

3.1 Introducción	57
3.2 Materiales y métodos.....	58
3.2.1 Extracción de almidón nativo	58
3.2.2 Caracterización química del almidón nativo.....	59
3.2.3 Tamaño de partícula.....	59
3.2.4 Contenido de amilosa y amilopectina	60
3.2.5 Modificación química del almidón	61
3.2.6 Grado de sustitución (DS) y el porcentaje de grupos acetilo (% AC) .	61
3.2.7 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier	62
3.2.8 Capacidad de retención de agua (CRA), Índice de solubilidad (IS) y Poder de hinchamiento (PH)	63
3.2.9 Capacidad de retención de aceite	63
3.2.10 Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del almidón	64
3.3 Resultados y discusión	64
3.3.1 Composición química de los almidones nativos	64
3.3.2 Contenido de amilosa y amilopectina	66
3.3.3 Tamaño de partícula.....	67
3.3.4 Modificación química del almidón de amaranto	68
3.3.5 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier	69
3.3.6 Capacidad de retención de agua (CRA), Índice de solubilidad (IS) y .	70

Poder de hinchamiento (PH)	70
3.3.7 Capacidad de retención de aceite (Craceite)	74
3.3.8 Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del almidón	75
3.4 Conclusiones	78
3.5 Literatura citada.....	80
RESUMEN.....	85
ABSTRACT	86
CAPÍTULO 4: ADICIÓN DE ALMIDÓN Y WPI EN LA FORMULACIÓN DE MASAS PARA ELABORACIÓN DE PAN LIBRE DE GLUTEN	87
4.1 Introducción	87
4.2 Materiales y Métodos.....	88
4.2.1 Formulación de masas	88
4.2.2 Propiedades reológicas de la masa	89
4.2.3 Determinación de humedad en panes	89
4.2.4 Determinación del contenido de proteína	89
4.2.5 Determinación de textura en el pan	90
4.3 Resultados	91
4.3.1 Humedad perdida en los panes	91
4.3.2 Contenido de proteína en el pan	92
4.3.3 Curva de flujo de las masas	93

4.3.4 Análisis de textura de los panes	96
4.4 Conclusiones	105
4.5 Literatura Citada	107

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Componentes de la harina de trigo y su función en la panificación ..	10
Cuadro 2. Modificaciones químicas y su efecto en el almidón de amaranto.	35
Cuadro 3. Clasificación taxonómica del amaranto.	39
Cuadro 4. Composición química de diferentes especies semilla de amaranto (por 100 g de parte comestible, base seca).	41
Cuadro 5. Principales estados productores de amaranto.	42
Cuadro 6. Caracterización del almidón de amaranto (<i>Amaranthus hypochondriacus</i>).	43
Cuadro 7. Concentración de amilosa y amilopectina para la elaboración de la curva estándar.	60
Cuadro 8. Análisis proximal del almidón de amaranto nativo.	65
Cuadro 9. Capacidad de retención de aceite del almidón nativo y acetilado.	75
Cuadro 10. Temperatura de gelatinización y viscosidad máxima de los almidones evaluados.	77
Cuadro 11. Formulación de masas para cada tratamiento por kg de harina.	88
Cuadro 12. Contenido de proteína en los diferentes tratamientos.	92
Cuadro 13. Parámetros de regresión del modelo Carreu.	94
Cuadro 14. Firmeza de los panes durante 3 días de almacenamiento.	99
Cuadro 15. Cohesividad de los panes durante 3 días de almacenamiento.	101

Cuadro 16. Elasticidad de los panes durante 3 días de almacenamiento.103

Cuadro 17. Masticabilidad de los panes durante 3 días de almacenamiento. .105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de las proteínas de gluten	12
Figura 2. Gráfica general del análisis de perfil de textura	21
Figura 3. Estructura química de la amilopectina	27
Figura 4. Estructura química de la amilosa	28
Figura 5. Representación esquemática de la estructura del gránulo de almidón.	31
Figura 6. Reacción química en la acetilación.	37
Figura 7. Cortes transversal y longitudinal del grano de amaranto.....	38
Figura 8. Curva de calibración para la determinación del contenido de amilosa.	67
Figura 9. Distribución del tamaño de partícula del almidón nativo.....	68
Figura 10. Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) de almidón nativo de amaranto.....	69
Figura 11. Efecto de la temperatura en la Capacidad de retención de agua, en el almidón nativo y acetilado.....	71
Figura 12. Efecto de la temperatura en el Índice de solubilidad del almidón nativo y acetilado.	72
Figura 13. Efecto de la temperatura en el Poder de Hinchamiento de almidón nativo y acetilado.	74

Figura 14. Comportamiento de la viscosidad de suspensiones al 10 % de almidón de amaranto nativo y acetilado durante la modificación de la temperatura.	78
Figura 15. Porcentaje de humedad pérdida durante el primer día en los diferentes tratamientos ensayados.....	91
Figura 16. Comportamiento de la viscosidad en las masas, en función de la tasa de corte.	95
Figura 17. Panes elaborados con las diferentes formulaciones.	96
Figura 18. Firmeza de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.	98
Figura 19. Cohesividad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.....	100
Figura 20. Elasticidad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.....	102
Figura 21. Masticabilidad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.....	104

RESUMEN GENERAL

ELABORACIÓN DE UN PAN LIBRE DE GLUTEN MEDIANTE MASAS ADICIONADAS CON ALMIDÓN MODIFICADO DE AMARANTO Y WPI

En este trabajo se llevó a cabo la extracción y caracterización fisicoquímica de almidón de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*, variedad revancha). El almidón nativo se modificó químicamente incorporando grupos acetilo, se evaluó el efecto que tuvo la acetilación en la capacidad de retención de agua, índice de solubilidad, poder de hinchamiento y capacidad de retención de aceite, la temperatura de gelatinización y la viscosidad se determinaron mediante un reómetro (Anton Paar Physica MCR 300, Gaz, Austria). El almidón obtenido se utilizó en la formulación de masas para pan libre de gluten, fue incorporado con aislado de proteína de lactosuero (por sus siglas en inglés, WPI), variando los porcentajes en la formulación, para evaluar su efecto en la viscosidad de las masas, y en la retención del gas dentro de la miga, retención de humedad en el pan y se evaluaron las características texturales del pan (firmeza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad) durante los tres primeros días. Los resultados fueron comparados con un pan elaborado con harina de trigo para determinar cuál fue la formulación que presentó características similares a este, el conocimiento de las propiedades del almidón otorgadas por la modificación química permite hacer inferencia sobre la aplicación del almidón en algunos productos alimenticios.

Palabras clave: almidón nativo, almidón acetilado, textura.

* Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Betzaida Areli Santiago Santos
Director: Eleazar Aguirre Mandujano

ABSTRACT

ELABORATION OF A GLUTEN-FREE BREAD BY THE ADDITION OF DOUGH WITH MODIFIED AMARANTH STARCH AND WPI*

The extraction and physicochemical characterization of amaranth starch (*Amaranthus hypochondriacus*, revancha variety) was investigated through this project. The native starch was chemically modified by incorporating acetyl groups. The acetylation effect on water retention capacity, solubility index, swelling power and oil retention capacity, gelatinization temperature and viscosity was determined using a rheometer (Anton Paar Physica MCR 300, Gaz, Austria). The obtained starch was used to formulate gluten-free bread dough; it was incorporated with whey protein isolate, varying the percentages in the formulation to evaluate its effect on the viscosity of the dough, gas retention within the crumb and moisture retention in the bread. The textural characteristics of the bread (firmness, cohesiveness, elasticity and chewiness) were evaluated in the first three days. The results were compared with a bread made with wheat flour to determine which formulation presented characteristics similar to it. Knowledge of the starch properties granted by the chemical modifications allows making inferences regarding the application of the starch in some food products.

Key words: native starch, acetylated starch, texture.

* Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Betzaida Areli Santiago Santos
Advisor: Eleazar Aguirre Mandujano

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente existen muchos mitos y dudas sobre el gluten, principalmente si su uso es benéfico para la salud o si genera alergias e intolerancias para algunas personas. La exposición al gluten puede crear las condiciones propicias para la aparición de ciertas patologías en algunos humanos, siendo la enfermedad celíaca la más conocida (Sapone *et al.*, 2012). Según estadísticas del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición, Doctor Salvador Subirán (2011), en México 1 de cada 100 personas son víctimas de intolerancia al gluten. Su tratamiento consiste en una dieta estricta libre de gluten (sin trigo, cebada, centeno o avena). Por lo menos el 90 % de los alimentos industrializados, enlatados y empaquetados que se comercializan en el país, contienen algún derivado de estos cereales. Para un celíaco mexicano sus gastos se incrementan, ya que los pocos productos aptos para ellos son de origen español, estadounidense, argentino o italiano y, por consecuencia, sus precios son elevados (Hernández, 2013).

En la industria alimentaria, los almidones más usados son los provenientes de diversas fuentes (papa, tapioca, cebada y maíz), pueden usarse para varios propósitos incluyendo espesantes (sopas, salsas, rellenos), gelificantes (dulces), estabilizantes (emulsiones) y como agentes de textura. Existen diversos trabajos que muestran las ventajas del uso de almidones en la panificación, modificando las formulaciones con la sustitución de harina por almidón modificado (almidones hidroxipropilados, acetilados y con enlaces cruzados) buscando mejorar la firmeza de la miga y retrasar el envejecimiento del pan. (Miyazaki, Van, Maeda y Morita, 2006) o para reemplazar los ingredientes más costosos (Eliasson y Gudmundsson, 2006).

Debido al valor nutricional al que presenta el amaranto por su alto contenido de proteínas, vitaminas y sus características funcionales, al ser un alimento hipoalergénico puede representar una alternativa de productos alimenticios aptos para pacientes con intolerancia al gluten (Arendt y Zannini, 2013). Por lo anterior, se propuso realizar la extracción de almidón a partir de semillas de amaranto y su posterior modificación química, con objeto de inducirle características estructurales que permitan la formulación y el desarrollo de pan que sustituyan a aquellos elaborados con harina de trigo y sean aptos para el consumo de personas intolerantes al gluten.

1.1 Objetivo general

Elaborar pan libre de gluten a partir de masa adicionada con almidón de amaranto y WPI que presente características similares a uno elaborado con harina de trigo.

1.2 Objetivos específicos

Determinar el método de extracción de almidón de amaranto.

Modificar químicamente el almidón nativo de amaranto mediante un proceso de acetilación.

Caracterizar fisicoquímicamente el almidón de amaranto nativo y acetilado, mediante sus propiedades funcionales (Capacidad de retención de agua, Índice de solubilidad, Poder de hinchamiento, Capacidad de retención de aceite).

Desarrollar una metodología para elaboración de pan libre de gluten adicionado con almidón de amaranto nativo y acetilado.

Evaluar el efecto que tiene el Aislado de proteína de lactosuero (por sus siglas en inglés, WPI) y el almidón acetilado de amaranto sobre las propiedades de textura y sabor.

1.3 Hipótesis

La incorporación de almidón de amaranto acetilado permitirá obtener masas con adecuadas propiedades reológicas y resistencia a la retrogradación haciendo posible la elaboración de panes con textura similar a aquellos elaborados con harina de trigo.

1.4 Capítulos de tesis

El capítulo 3 de este documento de tesis está enfocado en la extracción de almidón con agua destilada mediante el método utilizado por Medina *et al.*, (2010), así como la caracterización de almidón de amaranto del almidón nativo caracterización química (AOAC, 1998), contenido de amilosa y amilopectina por la técnica ISO 6647 (1987), modificación química mediante acetilación por el método propuesto por Carrascal (2013), Grado de sustitución y porcentaje de grupos acetilo mediante el método propuesto por Würzburg (1986), Capacidad de Retención de agua, índice de solubilidad y poder de hinchamiento por el método propuesto por Anderson, Conway, Pheiser y Griffin, (1969) y capacidad de retención de aceite de ambos almidones por el método de Beuchat (1977), y determinación de la viscosidad de ambos almidones, mediante pruebas de esfuerzo controlado en un reómetro de esfuerzo controlado por Anton Paar Physica MCR 300 (Gaz, Austria) de ambos almidones.

En el capítulo 4 se presentan las formulaciones del pan tipo mantecada, utilizando el almidón (nativo o acetilado) adicionando del 5 o 10 % en harina de arroz, de igual manera se adicionó aislado de proteína de lactosuero (WPI) variando del 5 al 10 %. Para evaluar el efecto del almidón y WPI, se determinó el contenido de humedad y proteína de cada formulación, y se determinó la textura de panes elaborados durante los tres primeros días, mediante los parámetros de firmeza, cohesividad, elasticidad y cohesividad, para determinar cuál fue el efecto que tuvieron la adición de proteína y almidón en los panes elaborados y

determinar cuál fue la formulación que presentó características texturales similares a un pan con gluten.

1.5 Literatura citada

Association Official methods of analysis of AOAC International. (1998). Maryland, E. U.: AOAC International.

Anderson R., Conway, H.F., Pheiser, V.F. & Griffin, E.L. (1969). Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4-12.

Arendt E. K. & Zannini E. (2013). *Cereal grains for the food and beverage industries*. 1^a ed. Philadelphia E.U.: Editorial Woodhead Publishing Limited.

Beuchat L. R. (1977). Functional and electrophoretic characteristics of succinylated peanut flour protein. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 25, 258-261.

Cano-Montiel A. A. (2008). Nuevas tendencias en panificación. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2, 1-7.

Carrascal S. J. J. (2013). Acetilación de almidón de *Arracacia xanthorrhiza* y evaluación de su aplicación como posible auxiliar farmacéutico (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia). Consultada en <http://www.bdigital.unal.edu.co/11936/1/juanjosecarrascalsanchez.2013.pdf> Fecha de consulta: 06/06/2016.

Eliasson A. C. & Gudmundsson M. (2006). *Starch: Psicochemical and Functional Aspects In Carbohydrate in Food*, (2^a ed.) Taylor & Francis Group, Boca Ratón-Florida.: CRC Press.

Hernández H. O. (2013) *La enfermedad celiaca. Un dilema con futuro*. Celiacos de México A.C. Disponible en:

<http://celiacosdemexico.org.mx/respaldo/los-documentos/guia-enfermedad-celiaca-resumen/> Fecha de consulta: 10/11/17.

International Organization for Standardization (1987). Rice -- Determination of amylose content. ISO 6647.

Medina C., Paredes A., Rodríguez María E., Moreno M., Belén-Camacho D., García D. & Ojeda C. (2010). Evaluación de métodos de extracción de almidón a partir de cotiledones de mango. BIOAGRO 22, 68-69.

Miyazaki M., Van H. P., Maeda T. & Morita N. (2006). Recent advances in applications of modified starches for breadmaking, Trends in Food Science & Technology, 17: 591-599.

Sapone A., Bai, J.C., Ciacci, C., Dolinsek, J., Green, P.H.R., Hadjivassiliou, M., Kaukinen, K., Rostami, K., Sanders, D.S., Schumann, M., Ullrich, R., Villalta, D., Volta, U., Catassi, C., Fasano, A., (2012). Spectrum of gluten-related disorders: consensus on new nomenclature and classification. BMC Medicine. 10, 1-13.

Würzburg O. B. (1986) Modified Starches: Properties and Uses. 1^a ed., Boca Raton, Estados Unidos de América.: CRC Press.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El Pan

El pan es un alimento hecho con harina mezclada con agua, sal, y aditivos autorizados (mejorantes, harina de malta, ácido ascórbico, etc.), en baja proporción y que después de amasada es moldeada, para posteriormente ser horneado (Diccionario de la lengua española, 2006; Mesas y Alegre, 2002).

Tradicionalmente es un producto derivado del trigo, es consumido en forma masiva, desde la antigüedad. Con la evolución de la humanidad, la forma de hacer pan también se ha modificado, los productos de pan han evolucionado para tomar muchas formas, cada uno con características distintivas, pero nunca ha perdido la importancia que tiene en la alimentación. En México el consumo per cápita anual asciende a 34 kg. La industria de la panadería en México se caracteriza por una variedad de productos. Entre un 70-75 % se relaciona con el pan blanco, el resto corresponde a pan dulce, galletas, pasteles, etc. (CANAINPA, 2015; Cauvain, 2007; Sánchez, Osella y de la Torre 2002).

2.1.1 Función de los ingredientes en el pan

A lo largo de los siglos, los panaderos artesanales han desarrollado variedades tradicionales de pan, para hacer el mejor uso de las materias primas disponibles y lograr la calidad en el pan deseada, el papel de los ingredientes varía de un tipo de producto a otro (Cauvain, 2007).

Harina

La harina es el producto obtenido de la molienda del endospermo del grano de trigo limpio, cuando se trata de otros granos de cereales o leguminosas es necesario especificar, es la materia prima esencial en la elaboración del pan (Mesas y Alegre, 2002).

La composición media de las harinas panificables oscila entre los siguientes valores:

- Humedad: 13-15 %.
- Proteínas 9-14 % (de las cuales 85 % son formadoras de gluten),
- Almidón 68-72 %.
- Cenizas 0.5-0.65 %.
- Materias grasa: 1-2 %.
- Azúcares fermentables: 1-2 %.
- Materias celulósicas: 3 %.
- Enzimas hidrolíticas: amilasas, proteasas, etc.
- Vitaminas: B1, B2, B6, ácido nicotínico, E, A, D, etc.

La composición y función de los componentes de la harina de trigo se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Componentes de la harina de trigo y su función en la panificación

Componente	Función
Proteínas	De almacenamiento: principalmente las proteínas formadoras de gluten (gluteninas y gliadinas). Solubles en agua: aproximadamente 2-3 % del peso total de la harina, contiene albuminas y globulinas, así como pentosanos.

Compuestos inorgánicos	Contiene aproximadamente cerca del 0.5 % de cenizas. Las materias inorgánicas que prevalecen en la harina son principalmente: fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, aluminio y azufre en formas de óxido y fosfatos, tienen poca influencia en la formación de la masa.
Lípidos	Contiene aproximadamente el 2.5 % de lípidos, de los cuales aproximadamente el 1.0 % son lípidos no polares (triglicéridos, diglicéridos, ácidos grasos libres y ésteres de esteroides). Los dos grupos de lípidos polares son galactosil glicéridos (0.6 %) y fosfolípidos (0.9 %). Durante el mezclado, ambas clases de lípidos están acomplejadas con gluten.
Almidón	Es relativamente inerte durante el mezclado de la masa, pero desempeña un papel como un relleno que contribuye a aumentar la viscosidad de la masa.

Fuente: Stauffer, 2007.

Proteínas formadoras de gluten

El gluten es considerado como una red tridimensional, formado por las interacciones que se establecen entre las proteínas que lo componen (gliadinas y gluteninas) y diferentes componentes (gránulos de almidón, lípidos y arabinoxilanos) que se encuentran estrechamente asociados, unidos por enlaces disulfuro, interacciones iónicas e hidrofóbicas y secuencias ricas en glicina, estos enlaces, son responsables de las propiedades viscoelásticas de la masa, sin embargo se requiere también de la adición de agua y la energía mecánica o térmica para inducir la formación del gluten. El gluten tiene la capacidad de atrapar gases durante la fermentación y horneado, esto permite que la masa se expanda para convertirse en un alimento más suave y ligero trigo. Algunas otras harinas de cereales, como cebada y centeno pueden formar gluten, pero en menor medida que el trigo (Cauvain, 2007; Edwards, 2007; Rosell y Foegeding, 2007; Ribotta, de Alcántara y Tadini, 2009). En la Figura 1 se muestra la representación esquemática de las proteínas formadoras de gluten.

Las gliadinas y gluteninas son las dos clases de proteínas encontradas en el gluten (Edwards, 2007).

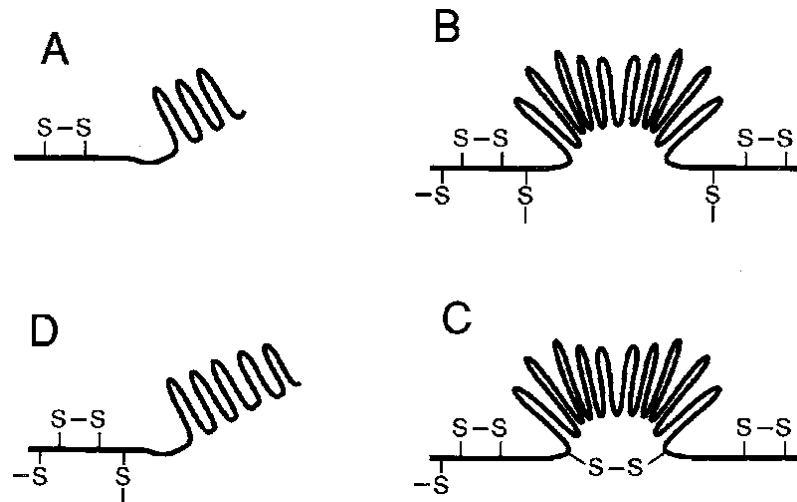


Figura 1. Representación esquemática de las proteínas de gluten.

(A) Gliadina; (B) subunidad de glutenina HMW, mostrando la posible acción de las espirales como 'resorte molecular'; (C) subunidad de glutenina de HMW, mostrando un puente disulfuro que impide la extensión de las espirales; (D) subunidad de glutenina LMW.

Fuente: (Stauffer, 2007).

Gliadinas: Son proteínas hidrófobas, de ahí su insolubilidad en agua o soluciones salinas, pueden dividirse en grupos basándose en su grado de hidrofobicidad. Las gliadinas más hidrófobas (γ gliadinas) aumentan el volumen de la barra de pan, mientras que las gliadinas del extremo más hidrófilo (α gliadinas) disminuyen el volumen de la barra. Las proteínas de la gliadina son relativamente pequeñas, con pesos moleculares en el intervalo de 30.000-100.000 Da. Son proteínas de cadena sencilla (Figura 1a) (Stauffer, 2007).

Gluteninas: Son bastante hidrofóbicas (su composición de aminoácidos es similar a la de la gliadina) pero tiene una estructura molecular muy diferente. La glutenina es una proteína polimérica. El peso molecular medio de la glutenina nativa se indica que es de aproximadamente 3×10^6 Da. La polimerización tiene

lugar a través de enlaces disulfuro intermoleculares. Se identifican dos grupos de subunidades. Las subunidades de glutenina de alto peso molecular (HMW-GS) tienen pesos moleculares aparentes en el intervalo de 80.000-120.000 Da (Figura 1b), mientras que los pesos moleculares de las subunidades de glutenina de bajo peso molecular (LMW-GS) son de aproximadamente 40.000-55.000 Da (Figura 1d). La relación molar de LMW-GS a HMW-GS es 2: 1 o superior (Stauffer, 2007).

Azúcar (sacarosa)

Su función principal es proporcionar alimento a las levaduras, la sacarosa es hidrolizada en glucosa y fructuosa por la enzima invertasa de la levadura, obteniendo dióxido de carbono y alcohol como resultado de la fermentación. Aproximadamente del 2 -3 % de azúcar es adecuado para la actividad de la levadura, el resto es azúcar sin fermentar que aparece como azúcar residual que participa en la caramelización y en la reacción de Maillard, en la cual ocurren interacciones entre los grupos carbonilo libres de los azúcares reductores y los grupos amino libres de los aminoácidos (Bello-Pérez, 2000; Indrani y Venkateswara, 2008).

Cuando se usa más del 6 % proporciona un sabor dulce, tiene un fuerte efecto inhibitor sobre la producción de gas en la levadura, disminuye la fuerza de desarrollo del gluten debido a su competencia por el agua ya que inhibe el complejo gliadina-glutenina- agua (Indrani y Venkateswara, 2008).

Grasa

Las grasas son ingredientes que se utilizan para mejorar el producto, se denominan grasas o aceites dependiendo de su estado físico. Sirven para lubricar el producto, mejora las propiedades organolépticas, mejoran la vida de anaquel conservando el producto fresco ya que mantiene la humedad retardando

el envejecimiento. Se usa en un nivel del 5 -10 %, dependiendo del tipo de pan, en el caso del pan dulce se utiliza del 16 -20 % (Buendía y Berrocal, 2016). La grasa lubrica al gluten y hace que la masa sea más extensible mejorando así la capacidad de retención de gas en masa y retarda el envejecimiento. La adición de grasa facilita el procesamiento de la masa y mejora el volumen del pan, uniformidad del grano de la miga y vida útil (Indrani y Venkateswara, 2008; Williams y Gordon, 2007).

Agentes leudantes

El polvo de hornear es un agente químico seco usado en la panificación. Hay varias formulaciones, todas contienen una base débil, típicamente carbonato ácido de sodio, y un ácido junto con el almidón para mantenerlo seco. Cuando se disuelven en agua, el ácido y el álcali reaccionan y emiten gas dióxido de carbono, que expande las burbujas existentes para incrementar el volumen de la mezcla (Indrani y Venkateswara, 2008).

Agua

Es necesaria para disolver los ingredientes sólidos y facilitar su incorporación, para hidratar proteínas e hidratos de carbono, y para el desarrollo de una red de gluten. Se ha estimado que alrededor del 46 % del total de agua absorbida está asociada con el almidón, el 31 % con las proteínas y el 23 % con los pentosanos. Actúa como un disolvente en la masa, y muchas de las reacciones que tienen lugar durante la fermentación no pueden ocurrir si no hay disolvente (Indrani y Venkateswara, 2008).

Sal (cloruro de sodio)

La sal se utiliza para mejorar el sabor de los otros ingredientes utilizados en la masa. Los niveles de uso son normalmente entre 1.0 y 2.5 %. La sal también

inhibe la fermentación debido al efecto de la presión osmótica ya que las células de levadura se deshidratarán parcialmente debido a la presión osmótica. El hecho de que la sal inhibe la fermentación puede usarse para controlar la tasa de fermentación. La sal endurece el gluten, aumenta la resistencia de la masa a la mezcla mecánica y disminuye la absorción de agua. La sal provoca la protección electrostática de los aminoácidos cargados en la superficie de las proteínas del gluten, lo que resulta en una interacción hidrofóbica e hidrofílica inter-proteína, lo que da como resultado un aumento de la fuerza de la masa (Indrani y Venkateswara, 2008; Stauffer, 2007).

Leche (proteínas del suero)

La leche presenta una composición diversificada, incluyendo grasa, proteínas (caseínas y proteínas de lactosuero) y lactosa. El 20 % de las proteínas de la leche de bovino pertenecen a un grupo de proteínas generalmente denominadas proteínas de suero de leche (Buendía y Berrocal, 2016; Indrani y Venkateswara, 2008). Las funciones de la leche en la panificación son la mejora del color en la corteza, mejora de textura y sabor, incorporación de nutrientes al pan (Buendía y Berrocal, 2016).

El lactosuero o suero de leche es la fase acuosa que se separa de la cuajada en el proceso de elaboración de quesos y contiene la mayor parte de las sustancias solubles, como lactosa, proteínas del suero (α lacto albuminas y β lacto globulinas). Los concentrados proteicos de lactosuero (WPI) han sido un ingrediente común en la industria panificadora, tienen como características importantes un 90 % de proteína y entre 4 - 5.5 % de agua. Han sido empleados como proteínas de alimentos funcionales en formulaciones de alimentos, por sus propiedades de hidratación, gelificación, emulsificación, y propiedades para formación de espuma de WPI (Foegeding y Luck, 2002; Güemes, Totosa, Hernández, Soto, Bolaños, 2009; Nicorescu *et al.*, 2009).

Huevo

Aumentan el valor nutritivo por su alto contenido de nutrientes (proteínas, vitaminas, minerales y aminoácidos), mejoran la textura y producen color en la miga y la corteza, actúan como un agente aglutinante para mantener los ingredientes juntos, elevan el volumen del pan cuando se realiza el batido ya que incorporan gas a la mezcla, contribuyen a la acción emulsionante debido a la lecitina natural y producir una miga más suave debido a la grasa y otros sólidos (Buendía y Berrocal, 2016; Indrani y Venkateswara, 2008).

Los huevos contienen 73 a 75 % de humedad, tienen la habilidad natural de unir y retener la humedad, y por lo tanto mejorar la calidad. Los huevos son una fuente importante de hierro, calcio, fósforo, vitamina A, vitamina D, tiamina y riboflavina, y suministran todos los aminoácidos esenciales (Indrani y Venkateswara, 2008).

2.2 Formación y estabilización de la masa de pan

La estructura de los alimentos está definida por el acomodo a niveles microscópicos y macroscópicos de sus constituyentes. Su grado de organización y estabilidad dependen del nivel de cohesión entre sus componentes así como de las fuerzas físicas y químicas que intervienen (Racilla, 2014).

La masa es una matriz compleja de diferentes componentes estrechamente asociados (proteínas, almidones, lípidos, etc.), inducida por la entrada de energía mecánica o térmica, sus polímeros pueden ser reticulados creando la estructura macroscópica a través de fuerzas inter e intramoleculares (Rosell y Foegeding, 2007).

Se denomina masas blandas o batidas aquellas compuestas básicamente por harina, azúcar y huevo, que, por la emulsión que sufren durante su batido, presentan un aspecto final esponjoso y emulsionado (Sánchez-Lafuente y Rey, 2012). Este tipo de formulaciones tiene un sistema de elaboración común,

comenzando por emulsionar la mantequilla con el azúcar para inyectar aire a la masa, posteriormente se agrega el líquido (huevo o leche), se mezcla, y finalmente se agrega la harina (García y Navarro, 2007). Este tipo de masa se esponja por primera vez al emulsionar el huevo, ya que al batir, la mezcla absorbe aire, formando celdillas microscópicas que aumentan el volumen de la mezcla, formando una espuma (Martín, Martín y Lozano, 2007).

Las burbujas en las espumas acuosas son alrededor de mil veces menos densas que la fase acuosa, por lo que la gravedad las alienta a elevarse a la parte superior. Para que una espuma permanezca estable, cada burbuja debe permanecer como una entidad separada el mayor tiempo posible. Las burbujas introducidas a la masa durante el mezclado se expanden como consecuencia de la producción de gas por los agentes de fermentación (Mills, Salt y Wilde, 2007).

2.2.1 Las proteínas en la formación de espuma

Las proteínas son los componentes protagónicos en un gran número de alimentos espumosos. Sin embargo, es importante recalcar que no todas las proteínas son capaces de formar estas estructuras. Lo anterior dependerá de la composición, de las propiedades fisicoquímicas que presenten las proteínas y del método de preparación de las espumas (Valdivia, 2014).

Diversas moléculas proteínicas que manifiestan la propiedad funcional de generar espumas presentan conformaciones globulares. Como contra parte existe otro grupo de proteínas de conformación fibrilar. Para que la propiedad funcional de espumado se manifieste, es necesario provocar un cambio de conformación que permita el desdoblamiento parcial de la estructura globular o fibrilar a un estado intermedio con la proteínas “desnaturalizadas”, es decir, parcialmente desdobladas. La molécula entonces es capaz de orientarse de manera rápida en la interface y reducir la tensión superficial. Asimismo, ubicada en este sitio, puede mostrar capacidad para establecer interacciones intermoleculares con moléculas de otras proteínas para lograr la formación de

una película cohesiva y viscoelástica que confiere estabilidad a la espuma (Valdivia, 2014).

Otro aspecto esencial es que estas proteínas deben tener una composición y distribución de aminoácidos que incluya un buen balance de residuos hidrofóbicos e hidrofílicos. Esto último es esencial, debido a que los grupos funcionales de los aminoácidos juegan un rol importante en la orientación y la estabilización de la película interfacial (Bravo-Díaz y González-Romero, 1997; Valdivia, 2014).

Los grupos hidrofílicos tienden a orientarse en la fase líquida, mientras que los hidrofóbicos se orientarán hacia una fase no polar o hacia el aire, además es, importante considerar otros factores que afectan la capacidad de espumado y la estabilidad, dentro de los cuales destaca el pH, el grado de hidrofobicidad y la concentración de otros ingredientes como la sal y el azúcar, los cuales pueden alterar la conformación y estabilidad de las moléculas de proteína (Bravo-Díaz y González-Romero, 1997; Valdivia, 2014).

La estabilidad de las espumas mejora si aumentamos la viscosidad del sistema con cantidades pequeñas cantidades de gomas y de proteínas (Racilla, 2014), la carga superficial, la movilidad y la reología de las capas absorbidas son factores determinantes para estabilizar los coágulos contra la coalescencia. Las burbujas altamente cargadas o aquellas con una capa muy gruesa se repelerán entre sí y por lo tanto reducirán las oportunidades de coalescencia (Mills *et al.*, 2007).

El problema en la masa del pan como en muchos otros sistemas alimenticios es que contienen una mezcla de material con actividad superficial que compite para desestabilizar las celdas de gas por mecanismos diferentes y antagonistas, la presencia de proteínas y polisacáridos restringe la movilidad de los tenso activos (Mills *et al.*, 2007).

La fase líquida de las espumas como el pan, pueden solidificarse durante la cocción, para formar la miga. Las espumas sufren por ser intrínsecamente estructuras inestables y en masas fermentadas la red de burbujas puede ser fácilmente interrumpida, causando una pérdida de gas y el posterior colapso de la estructura de espuma (Mills *et al.*, 2007).

Las propiedades de textura, como la “suavidad”, lo “ligero” y la “porosidad” en los alimentos que contienen espumas, están determinadas por el tamaño, la forma y la distribución de los sistemas o de las partículas suspendidas denominadas coloides (Valdivia, 2014).

Diversos alimentos aireados, pero de estructura sólida sometidos a procesos de horneado, pueden ser referidos como “esponjas”. La principal diferencia entre las esponjas y las espumas radica en que las esponjas son capaces de capturar grandes cantidades de líquidos sin disolverse, mientras que las espumas en alimentos no presentan esta propiedad y generalmente se disuelven en presencia de agua (Bravo-Díaz y González-Romero, 1997). Las esponjas se caracterizan por su baja densidad, alta porosidad, paredes muy delgadas que resultan en una macroestructura porosa muy abierta, resultado de la dispersión de un gas dentro de una matriz sólida (Valdivia, 2014).

2.3 Calidad del pan

Dentro de las técnicas para evaluar la calidad del pan, generalmente encajan tres grandes categorías: textura externa e interna, calidad de los ingredientes, sabor (Cauvain, 2007).

Las características externas son dimensiones críticas para la mayoría de los panes, como la altura, longitud y volumen. La apariencia externa del producto es un factor importante que atrae la atención del consumidor. Las características de la corteza varían, de acuerdo al producto (Cauvain, 2007). Las características internas se refieren principalmente a los tamaños, número y distribución de

alveolos en la miga, color de miga y cualquier defecto de calidad mayor, como agujeros indeseados, sin embargo, cada tipo de pan tiene sus propios requisitos de estructura (Cauvain, 2007).

2.3.1 Textura

La caracterización de la textura de la miga son medidas de las propiedades mecánicas como la firmeza, resiliencia, suavidad, debido a la asociación con la percepción de frescura del pan. Las evaluaciones de calidad son subjetivas, llevadas a cabo por un grupo de personas basadas en términos descriptivos (Layango, Valverde y Mayaute, 2015).

El análisis del perfil de textura (TPA) es una técnica que intenta utilizar una base común para las evaluaciones tanto subjetiva como objetiva de las cualidades alimentarias del producto (Layango *et al.*, 2015), simula la masticación de la mandíbula, ayuda a medir y a cuantificar parámetros como: dureza, gomosidad, masticabilidad, elasticidad, cohesividad entre otros, que se relacionan a su vez con variables como la tasa de deformación aplicada y la composición del producto. En la Figura 2 se observa la gráfica general del perfil de textura (Torres, González-Morelo y Acevedo, 2015).

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 N (Bourne, 1978; Szczesniak, 2002).

Dureza: Es la fuerza máxima que tiene lugar en cualquier tiempo durante el primer ciclo de compresión, se explica como la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar, se expresa en unidades de fuerza, N o ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) (Bourne, 1978; Civille y Szczesniak, 1976; Rosenthal, 1999).

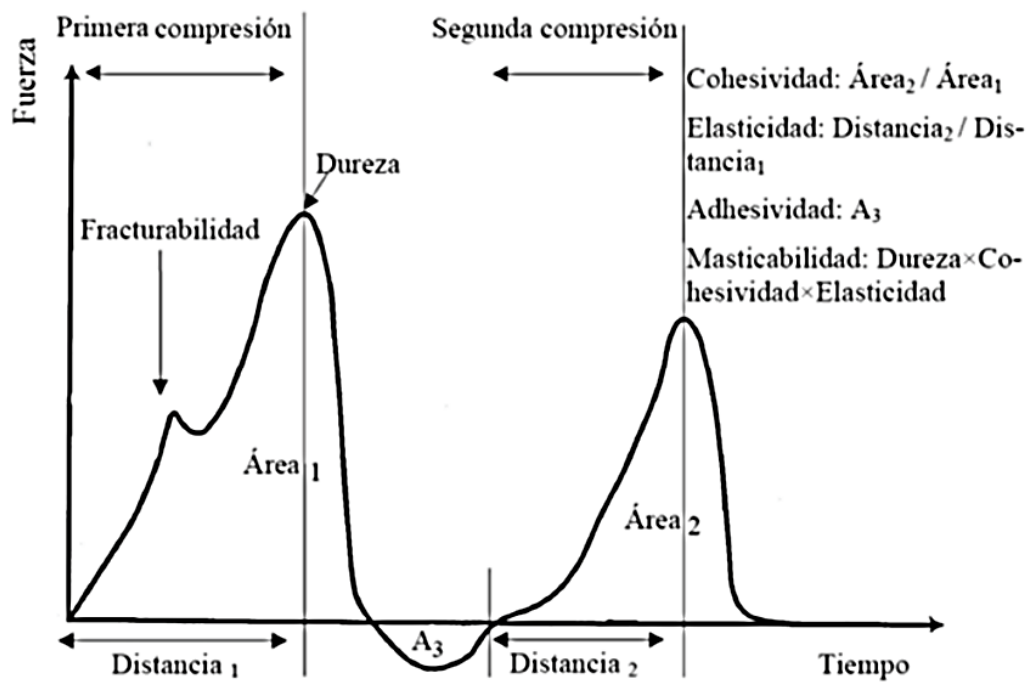


Figura 2. Gráfica general del análisis de perfil de textura

Fuente: Hleap y Velasco, 2010.

Cohesividad: cociente entre el área positiva bajo la curva de la 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 pueden deformar antes de romperse, es adimensional (Bourne, 1978; Civille y Szczesniak, 2002; Rosenthal, 1999).

Adhesividad: el área 3 se toma como una medida de adhesividad, representa el trabajo necesario para despegar el plato de compresión de la muestra o el trabajo necesario para despegar el alimento de una superficie (paladar), se mide en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2$ (Civille y Szczesniak, 2002; Rosenthal, 1999).

Elasticidad: es la altura que recupera el alimento durante el tiempo que recorre y entre el primer y segundo ciclo (D_2/D_1). Mide cuanta estructura original del

alimento se ha roto por la comprensión inicial, es adimensional (Bourne, 1978; Rosenthal, 1999).

Gomosidad: 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 $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ (Civille y Szczesniak, 1976).

Masticabilidad: 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 kg (Civille y Szczesniak, 1976).

2.3.2 Sabor del pan

Durante los procesos de fermentación natural que se producen en la panificación, se generan nuevos productos de sabor dentro de la masa. Tanto la intensidad de esos sabores como las notas particulares de sabor que se desarrollan cambian con el aumento del tiempo de fermentación. Los cambios de sabor comúnmente observados son los asociados con el desarrollo de sabores ácidos a partir de la actividad microbiana en la masa, que se detectan fácilmente en el sabor de la miga de pan, la contribución más importante al sabor del pan proviene del proceso de cocción (Layango *et al.*, 2015).

Durante esta etapa de endurecimiento térmico, muchos de los compuestos aromáticos presentes experimentan cambios importantes como el desarrollo de color en la corteza, estos cambios se asocian con los procesos complejos a los que comúnmente se hace referencia como "reacción de Maillard" y muchos de los compuestos están altamente aromatizados. Estos compuestos son muy importantes para nuestra percepción del sabor en muchos alimentos horneados, y se ha expresado que hasta el 80 % del sabor del pan se deriva de la corteza del producto (Layango *et al.*, 2015).

2.3.3 Envejecimiento del pan

Se refiere a los cambios indeseables que se presentan entre el tiempo que pasa desde que se elabora el pan hasta que se consume, involucrando aspectos como la firmeza de la miga, cambios en la humedad y pérdida de sabor (Layango *et al.*, 2015).

Los cambios en la humedad contribuyen al envejecimiento a través de la evaporación y la redistribución del agua, por la retrogradación del almidón, la amilosa va perdiendo agua, cristalizando, y volviéndose menos biodisponible, por lo que desciende el valor nutritivo en el pan duro (Moreno, 2000).

La firmeza de la miga es un indicador de frescura y se ve afectada por el envejecimiento, dando lugar a cambios en los componentes principales como son almidones (cambios en la estructura, retrogradación), proteínas, lípidos y agua (Layango *et al.*, 2015).

2.4 intolerancia al gluten

Existe, sin embargo, un grupo poblacional que presenta intolerancia a las prolaminas presentes en el trigo, la avena, la cebada y el centeno, este es un síndrome, caracterizado por una mal absorción intestinal es llamado enfermedad celíaca y puede ocasionar una severa malnutrición (Sánchez, Osella y de la Torre, 2002).

Según estadísticas del Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición, Doctor Salvador Subirán (INN) (2011). En México 1 de cada 100 personas son víctimas de intolerancia al gluten, este padecimiento afecta las vellosidades del intestino, que de no atenderse a tiempo pueden llevar hasta la muerte (Hernández, 2013), esto ha ocasionado una creciente demanda de alimentos sin gluten (Sapone *et al.*, 2012).

Sin embargo, los panes elaborados utilizando otro cereal, como sustitutos del trigo, raramente cuentan con buena aceptabilidad. La imposibilidad de las harinas de otros cereales de formar una fase continua y estructura de masa cuando son mezcladas con el agua es debido a la falta de propiedades viscoelásticas que sólo poseen las proteínas formadoras de gluten y que son imprescindibles para obtener panes de buena calidad. Para lograr esta aceptabilidad es necesario que los panes libres de gluten, formulados con estos cereales, tengan características de calidad similares a los panes elaborados con harina de trigo (Gallagher, Gormley, Arendt, 2003; Pedrosa y El-Dash, 2006).

Para intentar aproximarse a un pan de calidad aceptable es necesario incorporar a la formulación ingredientes capaces de aportar propiedades viscoelásticas a la masa que contribuyan a la retención del gas, aspecto de fundamental importancia para la formación y el establecimiento de la estructura que determina la textura final característica del pan elaborado con harina de trigo (Sánchez, González, Osella, Torres y De la Torre, 2008).

Bajo tales restricciones, las principales materias primas que han sido aplicadas en la producción de alimentos libres de gluten son almidones y harinas de maíz, arroz, sorgo, mijo, amaranto, quinua o leguminosas) (Witczak, Ziobro, Juszczak y Jaroslaw, 2016). En la panificación libre de gluten. Korus, Witczak, Ziobro y Juszczak, (2015) utilizaron almidones de maíz y papa adicionando harina de bellota encontraron un incremento en el volumen del pan, mejora en las características de la miga del pan; Mariotti, Lucisano, Pagani y Ng, (2009), utilizaron almidón de maíz, harinas de amaranto y aislado de chícharo para la elaboración de masas libres de gluten, el uso de estos ingredientes retrasó el envejecimiento del pan; Pongjaruvat, Methacanon, Seetapan, Founfuchat y Gamonpilas (2014), usaron harina de arroz y adicionaron almidón de tapioca pre gelatinizado, encontraron que el uso de almidón pre gelatinizado de tapioca dio como resultados masas resistentes a la deformación, mejoró el rendimiento, volumen y la miga del pan.

Las harinas que contienen almidón podrían ser usadas como reemplazo de harina de trigo en productos libres de gluten. Como principal componente, el almidón tiene un impacto directo sobre las propiedades de la harina, modificando la elasticidad de la masa por su presencia en la matriz total, tiene influencia crítica durante el proceso de horneado, cuando se gelatiniza, durante el almacenamiento. La retrogradación es responsable de la mayor parte del envejecimiento del pan (Gallagher, 2008; Stauffer, 2007).

2.5 El almidón

El almidón es uno de los polímeros de almacenamiento básico en muchas plantas, constituye el principal producto de almacenamiento en semillas y otros órganos y se almacena en forma de gránulos que presentan formas y tamaños diversos; los gránulos son estructuras altamente organizadas cuyas dimensiones y características varían entre especies (Bernal & Martínez-Barajas, 2005; Witczack *et al.*, 2016).

El principal sitio de la síntesis y acumulación de almidón en los cereales es en el endospermo, donde los gránulos de almidón son almacenados en los amiloplastos (Preiss, 2004). Durante la fotosíntesis las plantas acumulan compuestos de almacenamiento principalmente en forma de almidón y sacarosa (Nakamura, 2015).

De acuerdo a su tamaño, los gránulos de almidón se clasifican como: gránulos grandes ($>25\text{ }\mu\text{m}$), gránulos medianos ($\geq 10\text{ }\mu\text{m} \leq 25\text{ }\mu\text{m}$), gránulos pequeños ($\geq 5\text{ }\mu\text{m} \leq 10\text{ }\mu\text{m}$) y los gránulos muy pequeños ($<5\text{ }\mu\text{m}$) (Lindeboom, Chang y Tyler, 2004). El gránulo del almidón de amaranto es relativamente pequeño ($0.75\text{ }\mu\text{m}$ a $1,5\text{ }\mu\text{m}$) (Manni y Santiago, 2008).

2.5.1 Almidón nativo

Los almidones nativos son aquellos extraídos de su fuente natural que poseen propiedades únicas y específicas, influenciadas por el peso molecular promedio de la amilosa y la amilopectina, así como de su organización molecular, estos almidones carecen de versatilidad como ingredientes funcionales en la industria, ya que presenta algunas desventajas debido a que son afectados por las condiciones de procesos (por ejemplo, temperatura, presión, pH), esto reducen su aplicación industrial dada la baja resistencia al esfuerzo de corte, alta retrogradación, son inestables a los cambios de temperatura y pH, la cristalinidad e higroscopía son variables y muchas veces se rompen con el mínimo esfuerzo presentando una estructura débil que produce una pasta cohesiva y geles indeseables cuando se enfrían las pastas. Estas desventajas pueden ser superadas mediante modificaciones, que pueden ser por métodos químicos, físicos y enzimáticos (Adzahan, 2002; López-Soto, 2002).

2.5.2 Estructura química del almidón

Los gránulos de almidón, independientemente de la fuente o tejido de la planta, contienen dos principales tipos de polisacáridos, amilosa y amilopectina (Bertoft, 2004).

Amilopectina

La amilopectina es generalmente el principal componente del almidón y constituye del 65 - 85 % de la materia en los gránulos. Consiste en numerosas cadenas cortas de residuos de D-glucosa unidos por enlaces α -(1-4). Las cadenas están interconectadas a través de su lado extremo reductor mediante enlaces α -(1-6), juntas forman una macromolécula muy grande con un peso molecular entre 10^7 - 10^8 (Figura 3), aproximadamente una o dos veces mayor que las moléculas de amilosa (Bertoft, 2015). El peso molecular y el grado de ramificación de la amilopectina varía ampliamente y esta variedad estructural

contribuye a las diferencias en las propiedades químicas y físicas del almidón proveniente de diferentes fuentes (Bernal y Martínez-Barajas, 2005).

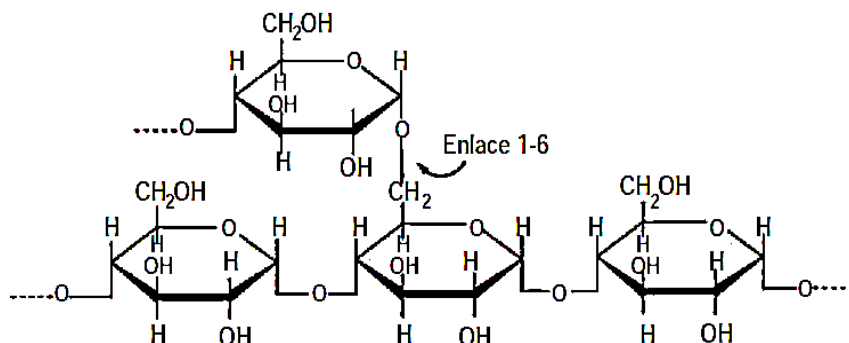


Figura 3. Estructura química de la amilopectina

La amilopectina está asociada con las regiones cristalinas del gránulo de almidón, conocidas como regiones A, B, C, (Singh, Singh, Kaur, Sodhi y Gill, 2003); el tipo A es característico de almidones de cereales, el B se presenta en almidones de tubérculos y de alta amilosa y el C (Mezcla de A y B), se presenta en almidones de tubérculos y legumbres (Jayakody y Hoover, 2008).

El índice de polidispersibilidad es grande, cada macromolécula tiene tantos extremos no reductores como cadenas, pero un solo residuo de glucosa que tiene un grupo final reductor libre. Las moléculas de amilopectina grandes tienen un grado de polimerización promedio de 13 400 - 26 500 moléculas dependiendo de la especie; las amilopectinas de tamaño intermedio tienen un tamaño de 4 400 – 8 400 moléculas y las más pequeñas de 700 – 2100 moléculas (Bertoft, 2015).

Amilosa

La amilosa es usualmente el segundo componente más abundante de los almidones, representando típicamente del 20 – 30 % de su peso, es un polisacárido constituido por cadenas lineales α -(1-4) o ligeramente ramificadas α -(1-6) (Figura 4), su tamaño difiere dependiendo de la fuente de almidón,

presentan un grado de polimerización en el intervalo de 1000 a 5000 unidades (Hanashiro, 2015).

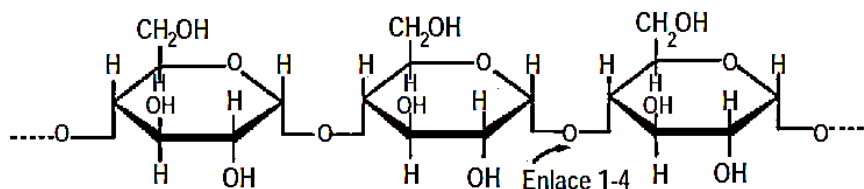


Figura 4. Estructura química de la amilosa

El número de anidroglicosa varía ampliamente dependiendo de la especie y la etapa de desarrollo de la planta. Algunas de las moléculas de amilosa tienen pequeñas ramificaciones (α -1,6-D-glucopiranosas), una por cada 170- 500 unidades de glucósilo (Preiss, 2004). La gran mayoría de las cadenas laterales en base molar son cadenas cortas, que tienen una distribución de longitud de cadena similar a la de la amilopectina. Las cadenas laterales no están dispuestas de manera agrupada, lo cual es una característica estructural común de la amilopectina (Hanashiro, 2015).

Su peso molecular se encuentra en el orden de 10^5 - 10^6 (Bernal y Martínez-Barajas, 2005). A temperatura ambiente y en solución, la molécula de amilosa adquiere una configuración helicoidal, en la cual cada seis residuos de glucosa constituyen una vuelta en torno al eje de simetría de la molécula. Esta configuración helicoidal es la responsable de la formación de complejos amilosa-yodo y de un característico color azul intenso (Singh *et al.*, 2003).

Otros componentes de los gránulos de almidón incluyen lípidos, proteínas minerales y humedad. El agua normal de hidratación en los almidones se localiza en el carbono 6 de los residuos de glucosa y su contenido depende de la fuente y el procedimiento de obtención, del proceso de secado y de la humedad relativa del medio. El contenido de humedad en los gránulos de almidón va de un 10 al 12 % en cereales y de 14 a 19 % en tubérculos y raíces. Todos los almidones

contienen pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, fosforo y trazas de materiales inorgánicos (Guizar, Montañez y García, 2008; Moorthy, 2002).

La presencia de fósforo en el almidón es de importancia tecno-funcional, ya que influye en la viscosidad, la claridad y la estabilidad de la pasta (Bao y Bergman, 2004). Se encuentran tres formas principales de fósforo en el almidón: monoésteres de fosfato, fosfolípidos y fosfatos inorgánicos, estando los monoésteres de fosfato unidos selectivamente a regiones específicas dentro de la molécula de amilopectina (Amagliani, O'Regan, Kelly y O'Mahony 2016).

El nivel de fosforilación del almidón varía significativamente dependiendo del origen botánico, mientras que el almidón de almacenamiento de los tubérculos de patata está altamente fosforilado, el fosfato unido al almidón es indetectable o se encuentra en trazas en almidones de cereales (Amagliani *et al.*, 2016). Adicionalmente, provoca un rápido hinchamiento de los gránulos de almidón a temperaturas relativamente bajas, lo que indica un débil enlazamiento interno, como consecuencia los grupos fosfato que se encuentran esterificados y ionizados contribuyen al hinchamiento del gránulo debido a una repulsión eléctrica mutua al forzar la expansión de la molécula (Whistler, 1984).

Los lípidos presentes en los gránulos de almidón se encuentran formando complejos de inclusión con las moléculas de amilosa; dichos complejos son insolubles en agua fría, pero se disocian al calentarse a temperaturas superiores a los 125 °C; entre los principales ácidos grasos que conforman los lípidos contenidos en los almidones, se encuentra el ácido palmítico, el ácido oleico, ácido linoleico y fosfolípidos (Tester, Karkalas y Qui, 2004).

Los lípidos tienen efecto en las propiedades físicas y funcionales de los almidones, estos disminuyen la capacidad de hinchamiento, la solubilidad y la capacidad de retención de agua; además son causantes de la formación de sabores indeseables. Dan lugar a pastas turbias y opacas debido a la formación

de complejos amilosa-lípidos insolubles, lo que afecta la viscosidad de los geles (Crowe, Seligman y Copeland, 2000; Hsu y Huang, 2000; Swinkels, 1985).

Las proteínas confieren cierta capacidad espumante. Cerca del 10 % de las proteínas asociadas al almidón, se encuentran en la superficie del gránulo y pueden ser fácilmente extraídas con agua o soluciones salinas. Estas proteínas pueden afectar la carga superficial del gránulo, lo cual influye directamente en la velocidad de hidratación, velocidad de hinchamiento y la gelatinización (Guizar *et al.*, 2008).

Estructura cristalina del almidón

El almidón se biosintetiza como gránulos semicristalinos cuya forma y tamaño dependen del origen botánico. El gránulo de almidón presenta una organización jerárquica y multiescalada con escalas de longitud estructural que van desde el décimo de nanómetro para el monómero de glucosa hasta algunos micrómetros para el tamaño de gránulo. Los niveles estructurales intermedios incluyen la distancia de repetición de laminillas cristalinas y amorfas (9-10 nm), los bloqueos (30-200 nm), los anillos de crecimiento (200-600 nm) y otros arreglos supramoleculares como superhélices (Lourdin, Putaux, Potocki-Véronèse, Chevigny, Rolland-Sabaté y Buléon, 2015).

La arquitectura interna de los gránulos de almidón nativos se caracteriza por "anillos de crecimiento" que corresponden a conchas concéntricas semicristalinas de 120-400 nm de espesor separadas por regiones amorfas. Las cáscaras cristalinas consisten en una alternancia regular de lamelas amorfas y cristalinas con una distancia de repetición de 9-10 nm. Las matrices paralelas de doble hélice hechas de ramas cortas de amilopectina forman láminas cristalinas. Su espesor de 5-7 nm presenta alguna variación dependiendo del origen botánico, en la Figura 5 se puede observar la representación de la estructura del gránulo de almidón (Lourdin *et al.*, 2015).

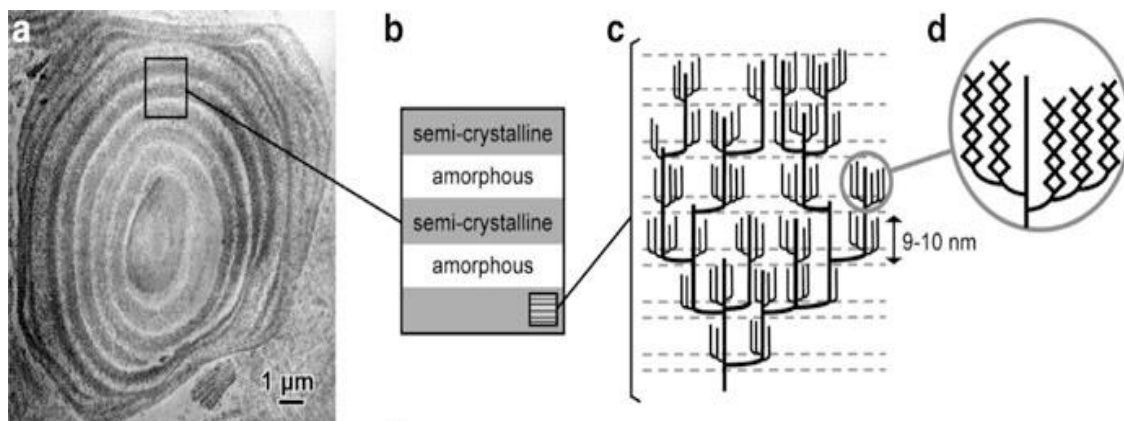


Figura 5. Representación esquemática de la estructura del gránulo de almidón.

Ultraestructura del gránulo de almidón de los anillos de crecimiento a la amilopectina: a) sección ultrafina de un gránulo de almidón de maíz ceroso; (b) alternancia de amorfos; (c) modelo de amilopectina; (d) detalle mostrando la agrupación de dobles hélices para las ramificaciones cortas de la amilopectina.

Fuente: (Lourdin *et al.*, 2015).

2.5.3 Cambios estructurales en el gránulo de almidón

Gelatinización

La gelatinización del almidón es un proceso que se da en presencia de agua, en el cual, pasa de un estado ordenado (estructura cristalina) a un estado desordenado, durante este proceso se absorbe calor, es decir, la gelatinización transforma a los gránulos insolubles del almidón, en una solución de sus moléculas constituyentes (amilosa y amilopectina). Las moléculas adyacentes de amilosa y amilopectina interactúan a través de puentes de hidrógeno, formando paquetes cristalinos orientados radialmente (llamados micelas) esto ocasiona que sea insoluble en agua fría. Estas micelas mantienen unido el gránulo, permitiendo su hinchamiento en agua caliente y la solubilización de moléculas individuales de almidón sin el rompimiento del gránulo (Hsu y Huang, 2000; Tester y Karkalas, 2001).

Cuando se calienta en exceso de agua (> 70 %) y se mantiene por un período de tiempo, los gránulos colapsan y una subsecuente alineación de los polímeros del almidón, ocurre una pérdida de cristalinidad, originando que la forma semicristalina cambie eventualmente a una forma amorfa (pérdida de birrefringencia) (Guizar *et al.*, 2008; Jayakody y Hoover, 2008; Singh *et al.*, 2003; Tester y Debon, 2000).

Cuando los gránulos absorben una gran cantidad de agua y se hinchan, incrementando la viscosidad del medio. La temperatura a la cual comienza este incremento de viscosidad es conocida como temperatura de gelatinización. Los gránulos de almidón se rompen solubilizando amilosa y amilopectina; la amilosa se difunde en el agua formando una malla y generando un gel y la amilopectina permanece en el gránulo para posteriormente perder su orden (Guizar *et al.*, 2008; Jayakody L. y Hoover, 2008; Singh *et al.*, 2003).

Retrogradación

Los geles de almidón están en estado metaestable de no equilibrio y por lo tanto sufren una transformación de su estructura al presentarse la agregación de cadenas y recristalización durante el almacenamiento. Los cristales comienzan a formarse y eventualmente se presenta un incremento gradual en la rigidez del gel y una separación de fases entre el polímero y el solvente (Prieto, Rubio, Román, Méndez, González y Prieto, 2009).

A medida que el sistema es enfriado, comienza una reasociación entre las moléculas de almidón, especialmente de amilosa, ocurre a diferentes grados. Las moléculas de amilosa tienen tendencia a reasociarse a través de puentes de hidrogeno con moléculas de amilosa adyacentes (Prieto *et al.*, 2009). En suficiente concentración, esto usualmente ocasiona la formación de un gel que incrementa nuevamente la viscosidad hasta alcanzar un punto final. Esta fase de la curva de viscosidad es comúnmente conocida como región de retrogradación,

en la cual, la pasta libera agua. Esta liberación de agua es llamada sinéresis y en productos con una larga vida de anaquel representa un problema grave (Guizar *et al.*, 2008; Jayakody L. y Hoover, 2008; Singh *et al.*, 2003).

La amilosa puede formar geles duros y películas fuertes, mientras que la amilopectina puede ser dispersa en agua y retrograda mucho más lento, lo que resulta en geles suaves y películas débiles (Witczack *et al.*, 2016).

Pérdida de birrefringencia

La birrefringencia indica la capacidad que tienen los gránulos de almidón para refractar la luz en dos direcciones, es decir, tienen dos índices de refracción, por lo que cuando irradian luz polarizada y desarrollan la típica “cruz de malta”, que indica un alto grado de orden molecular dentro del gránulo (Guizar *et al.*, 2008). La intensidad de la birrefringencia depende fuertemente de la forma y orientación de los gránulos con respecto al haz de luz. Cuando el almidón se gelatiniza el grano pierde su estructura cristalina que es la que le da la birrefringencia. Es un buen método para detectar las temperaturas de comienzo y finalización del proceso pero presenta problemas cuando se desea cuantificar el grado de gelatinización (Lourdin *et al.*, 2015).

2.5.4 Modificaciones del almidón

Los almidones modificados son aquellos almidones nativos que han sido cambiados en su estructura química repercutiendo en sus propiedades funcionales, con la modificación del almidón se logra mejorar sus propiedades funcionales, como la capacidad de retención de agua, la estabilidad al congelamiento, la capacidad de dispersión, resistencia a la retrogradación (López-Soto, 2002).

La importancia de modificar un almidón nativo radica en mejorar una o más propiedades fisicoquímicas específicas, como la resistencia a la degradación, el

aumento en el poder de hinchamiento, el mejoramiento de la fluidez, la compactación, entre otras, que faciliten el proceso de fabricación de un producto en un momento dado (López, Zaritzky y García, 2010). La modificación del almidón se puede hacer por métodos físicos y químicos.

La modificación física se realiza mediante la incorporación de calor y la modificación de condiciones como la humedad (pregelatinización), presión hidrostática y la irradiación.

Por otro lado los tratamientos químicos implican la introducción de grupos funcionales dentro de la molécula de almidón utilizando reacciones de derivatización (eterificación, esterificación, entrecruzamiento, etc.) o de descomposición (ácida o hidrólisis enzimática y oxidación) (López, Zaritzky y García, 2010).

Tipos de modificaciones químicas

La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo del polímero de almidón. Los grupos hidroxilo en las moléculas de almidón pueden ser sustituidos con un rango de grupos funcionales hidrófilos o hidrófobos, para lograr propiedades funcionales nuevas y únicas (Zhu, 2017), mediante reacciones vía éter, formación de ésteres, oxidación, son algunas modificaciones químicas aplicables al almidón.

La modificación química de almidón ha sido ampliamente usada, siendo los métodos más comunes los tratamientos con ácido, oxidación, sustitución, entrecruzamiento, esterificación y eterificación (Cui, 2005). Algunas de las modificaciones físicas y químicas realizadas en almidón de amaranto se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Modificaciones químicas y su efecto en el almidón de amaranto.

Modificación	Efecto en el almidón de amaranto
Hidroxipropilación	Pal, Singhal y Kulkarni (2000), reportaron que mejoró la estabilidad a la congelación-descongelación en <i>A. cruentus</i>
Succinilación (Grado de sustitución, 0.05-0.2)	Bhandari y Singhal, (2002a) el grado mayor de sustitución ocasionó disminución de la temperatura de gelatinización y en la viscosidad; el almidón mostró buena estabilidad a la congelación-descongelación (Bhandari y Singhal, 2002b).
Octenil Succinilación (Grado de sustitución molar de 0.02 %)	Bhosale y Singhal, (2006), aumentó el poder de hinchamiento, el pico de viscosidad, estabilidad de congelación-descongelación y la capacidad de emulsificante, pero disminuyó la temperatura de gelatinización.
Carboximetilación	(Bhattacharyya, Singhal y Kulkarni, 1995) reportaron mejor estabilidad a la congelación-descongelación y mayor viscosidad. Sin embargo, un grado de sustitución de 0.1-0.2, disminuyó la viscosidad.
Reticulación	Pérez, Bahnassey y Breene, (1993) reportaron un aumento en la temperatura de gelatinización y consistencia del gel, pero disminuyó resistencia al esfuerzo mecánico, los efectos fueron mayores para el almidón de <i>A. hypochondriacus</i> que <i>A. cruentus</i> . Otro estudio mostró que disminuyó el poder de hinchamiento, la viscosidad, y aumentó la dureza del gel (Gunaratne y Corke, 2007).
Hidrólisis ácida HCl (0.5 M), 12 horas	Se disminuyeron las temperaturas de gelatinización y la entalpía (ΔH). Con un mayor contenido de amilosa, los efectos de la hidrólisis ácida sobre la temperatura de gelatinización se fueron menos pronunciadas. La hidrólisis ácida prolongada disminuyó los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') (Kong, Kasapis, Bao y Corke, 2012).
Oxidación	Chattopadhyay, Singhal y Kulkarni (1998) reportaron eficacia de encapsulación similar entre la goma arábiga.
Tratamiento de calor y humedad Humedad:30% y temperatura:100 °C	En almidón de <i>A. cruentus</i> disminuyó el factor de hinchamiento y la lixiviación de amilosa, y aumentó la temperatura de gelatinización y viscosidad (Gunaratne y Corke, 2007).

λ-Irradiación λ 2, 4, 6, 8 y 10 kGy	<i>A. hypochondriacus</i> y <i>A. paniculatus</i> fueron irradiados, los resultados mostraron disminuyó las viscosidades, también el módulo de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') de las propiedades reológicas (Kong, Kasapis, Bao y Corke 2009).
Alta presión hidroestática	Linsberger-Martin, Lukasch y Berghofer (2012) encontraron aumentó en la hinchazón granular, con poca influencia en la formación de almidón resistente.

Fuente: Zhou, 2017

Acetilación

La acetilación del almidón es una modificación química en la cual se lleva a cabo una reacción entre los grupos hidroxilo de monómeros de glucosa y un reactivo como anhídrido acético, provocando que alguno de los grupos hidroxilo disponibles del monómero de glucosa se convierte en un grupo acetilo, alterando la estructura molecular del almidón. La acetilación depende de ciertos factores, tales como la fuente de almidón, concentración del reactivo, tipo de catalizador, tiempo de reacción y el pH de la suspensión (Bello-Pérez, Agama-Acevedo, Zamudio-Flores, Méndez-Montevalvo y Rodríguez-Ambríz 2010; Mello *et al.*, 2015).

La Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) sólo permite en alimentos, almidones con bajo grado de sustitución (máximo 2.5). El grado de sustitución está relacionado con la modificación química e indica el promedio del número de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón. El máximo grado de sustitución (GS) es 3 debido a que se presentan tres hidroxilos disponibles por unidad de anhidroglucosa (Peñaranda, Perilla y Algecira, 2008).

Los almidones acetilados tienen diferentes características a los nativos, presentan de 6 a 10 °C menos en la temperatura de gelatinización (T_g), La acetilación también incrementa la claridad y estabilidad de los geles y reduce la

retrogradación. Las reacciones que ocurren durante la acetilación son ilustradas en la Figura 6, en la reacción principal, un grupo hidroxilo del el almidón reacciona con anhídrido acético catalizada por una base, y forma un grupo acetil en la molécula del almidón (Prieto-Méndez, Trejo-Cárdenas, Prieto-García, Méndez-Marzo, Bello-Pérez y Román-Gutiérrez, 2010).

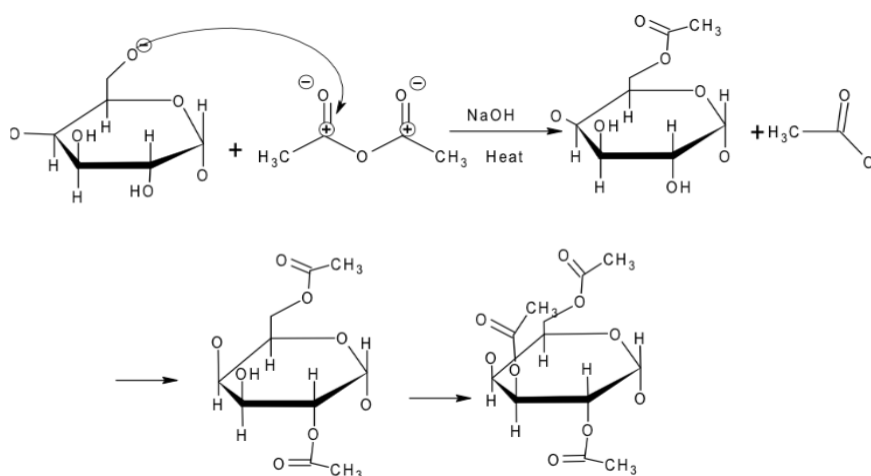


Figura 6. Reacción química en la acetilación.

Fuente: Xu, Miladinov y Hanna, 2004.

La acetilación del almidón puede ser realizada con relativa facilidad para mejorar de forma significativa las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón, siendo así que el almidón acetilado con un bajo grado de sustitución (0.01–0.2), presenta características como alto poder hinchamiento, mejor solubilidad en agua, y baja temperatura de gelificación. Los almidones con un alto grado de sustitución (2.0–3.0) muestran un gran número de aplicaciones como aglutinantes para tabletas, adhesivos termoplásticos, filtros de cigarrillos, materiales de revestimiento y no para alimentos, determinando así que grados de sustitución diferentes conllevan a una magnitud de cambio de las propiedades físico-químicas del almidón proporcional al grado de acetilación de las moléculas (Korhonen, Kanerva, Vidgren, Urtti y Ketolainen, 2004).

2.6 Amaranto

El amaranto ha despertado mucho interés en las últimas décadas, ya que tiene potencial para la elaboración de nuevos productos alimenticios por sus beneficios nutricionales y sus ventajas agrícolas (Mapes, 2010).

Se cultivaba en América desde hace 5 000 a 7 000 años, probablemente los primeros en utilizarlo fueron los mayas, de quienes aprendieron su consumo de otros pueblos de América, como los aztecas y los incas. Cuando los españoles llegaron a América, el amaranto era uno de los granos más apreciados por los aztecas. Se estima que producían de 15 000 a 20 000 toneladas por año y, además formaba parte de los tributos que cobraban a los pueblos sometidos. Con la llegada de los europeos a América se inició un intenso intercambio de cultivos en el que algunos de éstos cobraron mayor importancia mientras que otros llegaron casi a desaparecer como fue el caso del amaranto (Becerra, 2000).

Desde el punto de vista agronómico, es un cultivo que prospera en regiones temporales de baja precipitación. Es muy resistente a la sequía y al calor. Es fácil de establecer y crece vigorosamente por su fácil adaptación. Lo anterior hace del amaranto una excelente alternativa para la agricultura y para subsanar los problemas nutricionales en los países en desarrollo (Mapes, 2010).

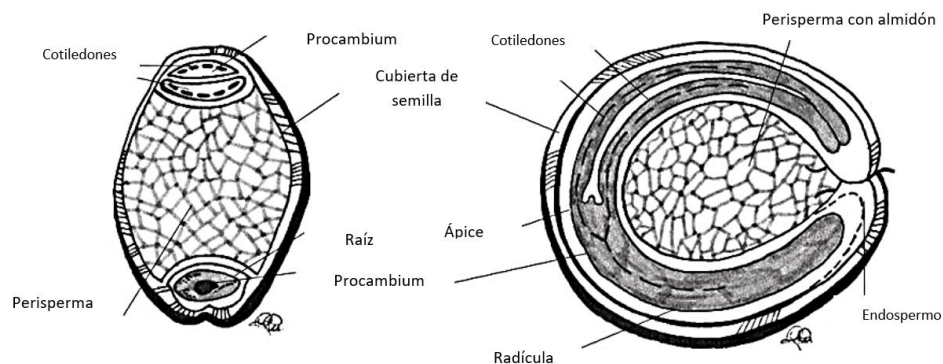


Figura 7. Cortes transversal y longitudinal del grano de amaranto.

Fuente: Arendt y Zannini, 2013.

Técnicamente el grano de amaranto es considerado como un pseudocereal, ya que tiene características similares a las de los granos de cereales verdaderos de las monocotiledóneas (Figura 7). Al igual que éstos, contiene cantidades importantes de almidón, con la diferencia de que éste se encuentra almacenado en el perispermo y el embrión ocupa gran parte del grano, conformando así una buena fuente de lípidos y también de proteínas. Sin embargo, por ser una dicotiledónea, no es considerado como un cereal verdadero (Becerra, 2000).

Amaranthus es un género que consiste en más de 50 especies, algunas de estas son cultivadas para ser usadas como cereales, vegetales, ornamentales y otras son consideradas malezas (Arendt y Zannini, 2013). En el Cuadro 3 se muestra la clasificación taxonómica del amaranto.

Cuadro 3. Clasificación taxonómica del amaranto.

Clasificación	Amaranto
Reino:	Plantae
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase:	<i>Caryophyllidae</i>
Orden:	<i>Caryophyllales</i>
Familia:	<i>Amaranthaceae</i>
Genero:	<i>Amaranthus</i>
Especies:	<i>caudatus</i>
	<i>cruentus</i>
	<i>hypocondriacus</i>

Fuente: CONABIO, 2009.

Amaranthus cruentus L., es una especie para producción de grano, es originaria de América Central, probablemente de Guatemala y el sureste de México, donde se cultiva y se encuentra ampliamente distribuida. Otra especie para producción de grano es *A. caudatus*, la cual es de día corto y se adapta mejor a las bajas temperaturas que las otras especies; es originaria de los Andes, de donde se extendió a otras zonas templadas y subtropicales. Igualmente, *A. hypochondriacus* se cultivaba desde el tiempo de los aztecas, actualmente se sigue cultivando y se encuentra ampliamente distribuida en México; también se cultiva en los Himalayas, en Nepal, y en el sur de la India, donde se han formado centros secundarios de diversificación (Espitia-Rangel, Mapes Sánchez y Escobedo-López, 2010).

2.6.1 Identificación y descripción de la planta

El amaranto es una planta monoica, anual que alcanza un tamaño de hasta 2 m de alto, presenta un tallo con rayas longitudinales, con frecuencia muy ramificado; sus hojas son láminas foliares ampliamente lanceoladas de 3 a 15 cm de largo por 1 a 7 cm de ancho. Su Inflorescencia presenta numerosas flores dispuestas en verticilos muy cercanos entre sí, por lo general pentámeras, pequeñas, de ± 0.2 mm de longitud. El fruto es subgloboso, se abre transversalmente, mide de 0.15 - 0.18 cm de diámetro, solo presenta una semilla, con pericarpio rugoso; semillas de contorno circular a aovado de 0.9 a 1.5 mm de largo y 0.8 a 1.2 mm de ancho; de color brillante café-rojizo a negro (CONABIO, 2009).

2.6.2 Composición química

Los granos contienen cerca de $150 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ de proteína y $630 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ de almidón. Su proteína es de alto valor biológico, presenta el balance de aminoácidos que más se acerca a la proteína ideal; la eficiencia proteica del amaranto es comparable con la de la caseína (Mapes, 2010).

Dependiendo de la especie de amaranto varia el porcentaje de la composición química, la especie *hypochondriacus* es la que presenta mayor porcentaje de almidón, además es la especie que más se produce en México. En el Cuadro 4 se muestra la composición química de las tres diferentes especies de amaranto.

Cuadro 4. Composición química de diferentes especies semilla de amaranto (por 100 g de parte comestible, base seca).

Componente	<i>Amaranthus caudatus</i>	<i>Amaranthus cruentus</i>	<i>Amaranthus hypochondriacus</i>
Proteína	12.9	17.8	15.6
Grasa	9.6	7.9	6.1
Fibra	8.0	4.4	5.0
Ceniza	3.0	3.3	3.3
Almidón	62.7	66.6	70.0

Fuente: Paredes, Guevara y Bello, 2006.

El grano contiene proteínas de calidad inusual, debido a la alta cantidad del aminoácido lisina, por lo que la FAO lo coloca en la clasificación de alimento que se acerca al ideal, ya que contiene entre 16 - 17 % de proteínas, en comparación con el trigo (12 – 14 %), el arroz (7 – 10 %) y el maíz (9 – 10 %). De las tres especies *Amaranthus cruentus* es la que presenta mayor porcentaje de proteína.

El aceite por su parte, es rico en ácidos grasos y es la especie *caudatus* La que presenta mayor porcentaje de grasa. Se ha encontrado que la semilla de amaranto contiene escualeno (aproximadamente de 7 a 8 % del aceite de la semilla). El principal hidrato de carbono en el amaranto es el almidón, con pequeñas cantidades de sacarosa y rafinosa. En cuanto a las vitaminas, el amaranto contiene riboflavina, tiamina, niacina y vitamina C, distribuidos principalmente en la cascara (García, 2012).

2.6.3 Propiedades del amaranto

Debido al contenido potencial de compuestos fitoquímicos que promueven la salud como la rutina y nicotiflorina, es considerado como un biofarmacéutico natural que podría incrementar la salud humana (Arendt y Zannini, 2013). Puede aportar cantidades importantes de fibra dietética y vitaminas B y E, puede ser una fuente importante de niacina (para el crecimiento y metabolismo), y lisina (para la producción de anticuerpos, hormonas y enzimas), así como de fósforo (para la formación de hueso y la función renal) y magnesio (para el metabolismo de azúcar en la sangre y relajante del músculo liso) (Rastogi y Shukla, 2013). El escualeno presente en la semilla es un ingrediente importante para la industria cosmética y precursor de esteroides (Espitia, 2012).

2.6.4 Principales estados productores en México

Los principales estados productores de amaranto en México se muestran en el Cuadro 5. El 87 % del volumen nacional se concentra en los estados de Tlaxcala y Puebla, y el 13 % en el resto de estados del país. La producción de amaranto se exporta principalmente a países como Estados Unidos, Chile e Italia (SIAP, 2016).

Cuadro 5. Principales estados productores de amaranto.

.Estado	Volumen (t)
Tlaxcala	4 795
Puebla	2 334
México	1 211
Morelos	102
Oaxaca	70

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2016.

Su consumo anual per cápita en México es 0.1 kg. El grano de amaranto producido en el país es exportado principalmente a países como Estados Unidos, Italia y Chile (SIAP, 2016).

2.7 Antecedentes de la investigación

En el Cuadro 6 se muestran investigaciones realizadas por diferentes autores, para la caracterización de almidón de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*).

Cuadro 6. Caracterización del almidón de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*).

Estudio	Referencias
Aislamiento del almidón	Wankhede <i>et al.</i> , (1989) usaron HgCl_2 para extraer almidón e inhibir enzimas, pero causaba toxicidad y residuos proteicos en los gránulos.
	Radosavljevic, Jane y Johnson (1998) usaron un método combinado de remojo alcalino con baja concentración de NaOH (0.05 %) seguida por tratamientos de proteasa. El almidón resultante contenía poca proteína residual (0.2 %) con buena recuperación, reportaron que este método es más económico.
	Middlewood y Carson, (2012) usaron microfiltración, reportaron que el contenido de proteína de la fracción de almidón fue alto en comparación con otros métodos.
Composición química del almidón	El contenido de amilosa de acuerdo con estudios reportados varia dese 0.14 – 10.6 %, 0.0-0,39 % de lípidos y 0.13 % de proteína (Pérez, Bahnassey y Breene, 1993b; Yanez, Messinger, Walker y Rupnow 1986; Stone & Lorenz, 1984; Sugimoto, 1981).
Forma y tamaño del gránulo	Paredes-López, Schevenin, Hernández-López, Cárebez-Trejo, (1989) encontraron una forma poligonal con 1 μm de diámetro; Marcone, (2001) ~1.1 μm y Kong <i>et al.</i> , (2009) reportan 1.05 – 1.09 μm de diámetro.
Temperatura de gelatinización	Wu y Corke, (1999) Encontraron una $T_0 = \sim 60\text{-}73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tomita (1981) reporta como $T_0 = 59\text{-}63\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_p = 67\text{-}70$ y

$T_c=76-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, Paredes-López y Hernández-López, (1991) encontraron $T_0=61.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_p=64.8$ y $T_c=73.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

**Propiedades
funcionales**

Pérez, Bahnassey y Breene (1993 b) reportaron el poder de hinchamiento: 3.28 % a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 17.5 % a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$; y como solubilidad 4.54 % a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 92 % a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$; Kong *et al.*, (2009) encontró que a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ el índice de solubilidad en agua fue de 90-91 %

Retrogradación

Baker y Rayas-Duarte (1998 b), reportaron que en una relación de 1:2.3 almidón agua, a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ el almidón se mantuvo 21 días con un porcentaje de retrogradación de 24.7; a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mantuvo 21 días con 32.8 % de retrogradación; a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mantuvo 21 días con 55.3 % de degradación.

Fuente: Extraída de Zhu (2017).

En el Cuadro 6 se observan las diferentes modificaciones que se han realizado en almidón de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), se puede observar que las modificaciones químicas otorgan características diferentes al almidón de amaranto, haciendo posible la diversificación de aplicaciones para incorporarlo a la industria alimentaria. Sin embargo no hay reportes de la utilización de almidones de amaranto acetilados en la incorporación de sistemas libres de gluten.

2.8 Revisión de literatura

- Adzahan N. M. (2002). Modification on wheat, sago and tapioca starches by irradiation and its effect on the physical properties of fish cracker (keropok). (Tesis de Maestría. Universiti Putra Malaysia). Consultada en: http://psasir.upm.edu.my/8466/1/FSMB_2002_5_A.pdf.
- Amagliani L., O'Regan J., Kelly A.L. & O'Mahony J. A. (2016), Review Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch. *Journal of Cereal Science*. 70,291-300.
- Arendt E. K. & Zannini E., (2013), Cereal grains for the food and beverage industries. 1ª ed. Reino Unido: Woodhead Publishing.
- Baker L.A. & Rayas-Duarte P. (1998b). Retrogradation of amaranth starch at different storage temperatures and the effects of salt and sugars. *Cereal Chemistry Journal*. 75, 308–314.
- Bhandari P.N. & Singhal R. S. (2002a). Studies on the optimisation of preparation of succinate derivatives from corn and amaranth starches. *Carbohydrate Polymers* 47, 277–283.
- Bhandari P. N., and Singhal R. S. (2002b). Effect of succinylation on the corn and amaranth starch pastes. *Carbohydrate Polymers* 48, 233–240.
- Bao J. & Bergman C.J. (2004). The functionality of rice starch. In *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Cambridge, Reino Unido. Woodhead Publishing Ltd.
- Bhattacharyya D., Singhal R. S. & Kulkarni P. R. (1995). Physicochemical properties of carboxymethyl starch prepared from corn and waxy amaranth starch. *Carbohydrate Polymer*. 27, 167–169.
- Becerra R. 2000. El amaranto: nuevas tecnologías para un antiguo cultivo. *CONABIO. Biodiversitas* 30, 1-6.
- Bello G. J. (2000). *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos*. 1ª ed. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Bello-Pérez A., Agama-Acevedo E., Zamudio-Flores P. B., Méndez-Montealvo G., S. L. & Rodríguez-Ambríz S. L. (2010). Efecto de grado bajo y alto acetilación en las características morfológicas, físico-químicas y

estructurales de almidón de cebada. LWT. Ciencia y Tecnología de Alimentos, 43, 1434-1440.

Bernal L. & Martínez-Barajas E. (2005). Una nueva visión de la degradación del almidón, Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle, México. 7(25), 77-90.

Bertoft E. (2004). Chapter 2. Analysing starch structure in Starch in food, structure function and applications. Bpca Raton. E.U.: CRCPress.

Bertoft E. (2015). Chapter 1. Fine Structure of Amylopectin, In Starch. Metabolism and Structure. Tokio. Springer.

Bhosale R. & Singhal R. (2006). Process optimization for the synthesis of octenyl succinyl derivative of waxy corn and amaranth starches. Carbohydrate Polymers 66, 521–527.

Bourne M. (1978). Texture Profile Analysis. Food Technology. 4, 204-223.

Bravo-Díaz, C. y González-Romero, E. "Showing properties of food foams with common dairy foods", Journal of Chemical Education, 1997, 74 (9), p. 1133-1135.

Buendia M. M. A. & Berrocal O. N. (2016). Panadería y pastelería comercial. 1ª. Ed. Lima Perú: Macro.

Cámara Nacional de la Industria Panificadora (CANAINPA). (2015). Disponible en <http://www.canainpa.com.mx> Fecha de acceso 31/07/2017.

Cauvain S. P. (2007). Chapter 1. Bread-The product In Technology of Breadmaking, (2ª ed.). Springer, Boston, MA.1-17.

Chattopadhyay S., Singhal R. S. & Kulkarni, P. R. (1997). Optimisation of conditions of synthesis of oxidised starch from corn and amaranth for use in film-forming applications. Carbohydrate Polymers 34, 203–212.

Chattopadhyaya S., Singhal R. S. & Kulkarni P. R. (1998). Oxidised starch as gum arabic substitute for encapsulation of flavours. Carbohydrate Polymers 37, 143–144.

- Civille G. & Szczesniak A. (1976). Guidelines to training a texture profile panel. *Journal of texture Studies*. 4, 204-223.
- CONABIO. (2009). Malezas de México, Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/amaranthaceae/amaranthus-hybridus/fichas/ficha.htm> fecha de consulta: 21/06/2016.
- Crowe T. C., Seligman, S. A. & Copeland L. (2000). Inhibitions of enzyme digestion of amylose by free fatty acids in vitro contributes to resistant starch formation, *Journal of nutrition*, 130, 2006-2008.
- Cui S. (2005). Food Carbohydrates: Chemistry, physical properties and applications. Agriculture & Agri-Food. Ontario (Canada): Guelph, CRC Press.
- Edwards W. P. (2007). The Science of Bakery Products. Reino Unido. RSC Publishing.
- Espitia-Rangel E., Mapes-Sánchez C., Escobedo-López D. (2010), Conservación y uso de los recursos genéticos de amaranto en México, Celaya, inifap-Centro de Investigación Regional Centro.
- Espitia-Rangel, E. (2012). Amaranto: ciencia y tecnología, México, inifap/sinarefi.
- Foegeding E. & Luck P. (2002). Whey protein products In: Encyclopedia of Foods Sciences and Nutrition. New York. Academic Press.
- Gallagher E., Gormley T. R. & Arendt E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal Food Engineering*. 56, 153-161.
- Gallagher E. (2008). Formulation and nutritional aspects of gluten-free cereal products and infant foods. In *Gluten-free Cereal Products and Beverages*. Amsterdam, Boston. Academic Press.
- García I. L. (2012). Variedades de amaranto y fechas de siembra para rendimiento de grano y forraje en san Luis Potosí, Tesis Profesional, Facultad de agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, disponible en: <http://ninive.uaslp.mx/jspui/bitstream/i/3458/1/IAF1VAR01201.pdf>.

- García C. D. & Navarro T. V. J. (2007). Elaboraciones básicas para pastelería-repostería. Clasificación de las pastas. Técnicas de elaboración y presentación. 1ª. Ed. España: ideas propias.
- Güemes V. N., Totosaus A., Hernández J. F., Soto S. & Bolaños A. E. N. (2009). Propiedades de textura de masa y pan dulce tipo “concha” fortificados con proteínas de suero de leche. Ciencia y Tecnología de Alimentos. 29 (1), 70-75
- Guizar M. A., Montañez S. J. L. & García R. I. (2008). Parcial caracterización de nuevos almidones obtenidos del tubérculo de camote del cerro (*Dioscorea* spp). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 9 (1), 81-88.
- Gunaratne A. & Corke H. (2007). Gelatinizing, pasting, and gelling properties of potato and amaranth starch mixtures. Cereal Chemistry Journal. 84, 22–29.
- Hanashiro I. (2015). Chapter 2. Fine Structure of Amylose, In Starch. Metabolism and Structure. Tokio. Springer.
- Hernández H. O. (2013). La enfermedad celiaca. Un dilema con futuro. Celiacos de México A.C. Disponible en: <http://celiacosdemexico.org.mx/respaldo/los-documentos/guia-enfermedad-celiaca-resumen/> Fecha de consulta 10/11/17.
- Hsu C. L., Lu S. & Huang C. (2000). Viscoelastic changes of rice starch suspensions during geatinization. Journal of food science, 65 (2), 215-220.
- Indrani D. & Venkateswara R. G. (2008). Capítulo 2. Functions of Ingredients in the Baking of Sweet Goods en Food Engineering Aspects of baking sweet goods. Dublin, Irlanda: CRC Press.
- Jayakody L. & Hoover, R. (2008). Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins – A review. Carbohydrate Polymers. 74, 691-703.
- Kong X.L., Kasapis S., Bao J.S. & Corke, H. (2012). Influence of acid hydrolysis on thermal and rheological properties of amaranth starches varying in amylose content. Journal of the Science of Food and Agriculture. 92, 1800–1807.

- Kong X. L., Kasapis S., Bao J. S. & Corke H. (2009). Effect of gamma irradiation on the thermal and rheological properties of grain amaranth starch. *Radiation Physics Chemistry*. 78, 954–960.
- Korhonen O., Kanerva H., Vidgren M., Urtti A. & Ketolainen J., (2004), Evaluation of novel starch acetate–diltiazem controlled release tablets in healthy human volunteers. *Journal of Controlled Release*. 95 (3), 515-520.
- Layango G. H. M., Valverde G. K. H. & Mayaute D. Y. A. (2015). Evaluación de la goma de tara (*Caesalpinia spinosa*) como retenedor de humedad en una premezcla para pan de molde. (Tesis Profesional. Universidad Nacional del Callao). Consultada en: <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/432>.
- Lindeboom N., Chang P. R. & Tyler R. T. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Stärke*, 56, 89-99.
- Linsberger-Martin G., Lukasch B., & Berghofer E. (2012). Effects of high hydrostatic pressure on the RS content of amaranth, quinoa and wheat starch. *Starch* 64, 157–165.
- López O., Zaritzky N. & García M. (2010). Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of Food Engineering*. 100, 160-168.
- López-Soto M. (2002). Aplicación de procesos no convencionales (efecto Joule y pulverizado/mezclado con alta energía) para modificación (pre gelatinización) de dos almidones: Yuca (*Manihot esculenta*. Crantz) y Jicama (*Pachyrhizus arosus*). (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Lourdin D., Putaux J., Potocki-Véronèse G., Chevigny C., Rolland-Sabaté A. & Buléon A. (2015). Crystalline Structure in Starch, In *Starch. Metabolism and Structure*, Springer, Tokyo, 69- 85.
- Manni D. & Santiago L. (2008). Desarrollo de biomateriales a partir de almidón de amaranto modificado. 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Disponible en: http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/jovenesSAM08/Trabajos_completos/11.Biomateriales/11113ManniD.pdf Fecha de consulta: 10/11/17.

- Mapes S. C. (2010). El amaranto (*Amaranthus spp.*) planta originaria de México. Rev. AAPAUNAM. Academia, Ciencia y Cultura. 2 (4), 217-221.
- Marcone M. F. (2001). Starch properties of *Amaranthus pumilus* (seabeach amaranth): a threatened plant species with potential benefits for the breeding/amelioration of present *Amaranthus* cultivars. Food Chemistry. 73, 61-66.
- Mariotti M., Lucisano M., Pagani M.A., Ng P.K. (2009). The role of corn starch, amaranthflour, pea isolate, and Psylliumflour on the rheological properties and the ultrastructure of gluten-free doughs. Food Research International 42 (8), 963-975.
- Martín A. A., Martín A. J. A & Lozano L. R. (2007). La repostería básica profesional. (Aspectos transversales). Madrid, España: Visión Libros.
- Mello E.H. S., Colussi R., Zanella P. V., Bartz J., Radunz M. Villareal C. N. L., Guerra D. A. R. & Rosa Z. E. (2015). Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches. Food Chemistry. 168, 247-256.
- Mesas J. M. & Alegre M. T. (2002). El pan y su proceso de Elaboración, Ciencia y Tecnología Agroalimentaria. 3 (5), 307-313.
- Middlewood P.G. & Carson J.K. (2012). Extraction of amaranth starch from an aqueous medium using microfiltration: Membrane characterisation. Journal of Membrane Science. 405, 284-290
- Mills E. N. C., Salt L. J. & Wilde P. J. (2007). Bubble formation and stabilisation in bread dough in Understanding and Controlling the Microstructure of Complex Foods, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 691-701.
- Moorthy S. N. (2002). Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: a review. Starch, 54, 559-592.
- Moreno R. R. (2000). Nutrición y dietética para tecnólogos de alimentos. Madrid, España: Díaz de Santos, S. A.
- Mundigler N. (1998). Isolation and determination of starch from amaranth (*Amaranthus cruentus*) and quinoa (*Chenopodium quinoa*). Starch 50, 67-69.

- Nakamura Y. (2015). Chapter 5. Biosynthesis of reserve starch. In *Starch. Metabolism and Structure*. Tokyo. Springer.
- Nicorescu I., Loisel C., Riaublanc A, Vial C., Djelveh G., Cuvelier G. & Legrand J. (2009). Effect of dynamic heat treatment on the physical properties of whey protein foams. *Food Hydrocolloids*, 23(4), 1209–1219.
- Pal J., Singhal R.S. & Kulkarni P.R. (2000). A comparative account of conditions of synthesis of hydroxypropyl derivative from corn and amaranth starch. *Carbohydr. Polym.* 43, 155–162.
- Paredes-López O., Schevenin M.L., Hernández-López D., & Cáramez-Trejo A. (1989). Amaranth starch - isolation and partial characterization. *Starch* 41, 205–207.
- Paredes-López O., & Hernández-López D. (1991). Application of differential scanning calorimetry to amaranth starch gelatinization-influence of water, solutes and annealing. *Starch* 43, 57–61.
- Paredes L. O., Guevara L. F. & Bello P. L. A. (2006). Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas.1ª. México. Secretaría de Educación Pública.
- Pedrosa S. C. & El-Dash, A. A. (2006). Farinha extrusada de arroz como sustituto de glúten na produção de pão de arroz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 56(3), 288-298.
- Peñaranda C. O., Perilla P. J. & Algecira E. N. (2008). Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Revista Ingeniería e Investigación*. 28(3), 47-52.
- Pérez E., Bahnassey Y.A., & Breene W.M. (1993). Some chemical, physical, and functional properties of native and modified starches of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus cruentus*. *Starch* 45, 215–220.
- Preiss J. (2004). Plant starch synthesis en *Starch in Food*, Michigan State University. USA.
- Prieto-Méndez J., Trejo- Cárdenas C. L., Prieto-García M. A., Méndez-Marzo L. A., Bello-Pérez & Román-Gutiérrez A. D. (2010). Acetilación y caracterización del almidón de cebada. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 6 (1), 32-43.

- Prieto M. J., Rubio H. C. U., Román G. A. D., Méndez M. M. A., González R. C. A. & Prieto G. F. (2009). Degradación física de almidón de cebada (*Hordeum sativum* jess). Correlación entre la gelatinización y el tamaño de gránulos. *Revista Muticiencias* 9 (2), 115-125.
- Pongjaruvat W., Methacanon P., Seetapan N., Fuongfuchat A., Gamonpilas C. (2014). Influence of pregelatinised tapioca starch and transglutaminase on dough rheology and quality of gluten-free jasmine rice breads. *Food Hydrocolloids* 36, 143-150.
- Racilla G. D. (2014). Seminario de Espumas alimentarias basadas en proteínas, disponible en http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Seminario-Espumasdeproteinas_27548.pdf Fecha de consulta 06/11/1017.
- Radosavljevic M., Jane J. & Johnson L.A. (1998). Isolation of amaranth starch by diluted alkaline-protease treatment. *Cereal Chemistry Journal* 75, 212–216.
- Rastogi A. & Shukla S. (2013). “Amaranth: A new millenium crop of nutraceutical values”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53,109-125.
- Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española. (2006) 1ª ed. Madrid: Espasa Calpe.
- Ribotta P. D., De Alcantara P. F. P. & Tadini C. C. (2009). Capítulo 1. Masas Congeladas en Alternativas tecnológicas para la elaboración y la conservación de productos panificados, Universidad Nacional de Córdoba 1ª Ed., Argentina, 16-17.
- Rosell C. M. & Foegeding A. (2007). Interaction of hydroxypropylmethylcellulose with gluten proteins: small deformation properties during thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, 21(7), 1092-1100.
- Rosenthal A. (1999). Food texture, measurements and perception. Maryland, USA.: Aspen Publisher, INC.
- Sánchez H. D., Osella C. A. & de la Torre M. A. (2002). Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of Food Science* 67(1), 416-419.

- Sánchez H. D., González R. J., Osella C. A., Torres R. L. & De la Torre M. A. G. (2008). Elaboration of bread without gluten from extruded rice flours. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 6(2) 109-116.
- Sánchez-Lafuente A. C., Rey A. L. (2012). Elaboraciones y presentaciones de productos hechos a base de masas y pastas. HOTR09509. 1ª. Ed. Málaga, España: ic.
- Sapone A., Bai J.C., Ciacci C., Dolinsek J., Green P.H.R., Hadjivassiliou M., Kaukinen K., Rostami K., Sanders D.S., Schumann M., Ullrich R., Villalta D., Volta U., Catassi C. & Fasano A. (2012). Spectrum of gluten-related disorders: consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine*. 10, 1-13.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). Atlas Agroalimentario 2016. 1ª ed. 30-31. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016 Fecha de consulta 10/11/17.
- Singh S., Singh J., Kaur L., Sodhi N. S. & Gill B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources - A review. *Food Chemistry*, 81, 219-231.
- Stauffer C. E. (2007), Chapter 11. Principles of Dough Formation in Technology of Breadmaking (2ª ed.). Reino Unido. Springer.
- Stone L.A. & Lorenz K. (1984). The starch of *Amaranthus* – physico-chemical properties and functional characteristics. *Starch* 36, 232–237.
- Sugimoto Y., Yamada K., Sakamoto S. & Fuwa H. (1981). Some properties of normal- and waxy-type starches of *Amaranthus hypochondriacus* L. *Starch* 33, 112–116.
- Swinkels J. M. (1985). Sources of Starch, Its Chemistry and Physics In *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker Inc., New York, 15-46.
- Szczesniak A. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*. 13, 215-225.
- Tester F. R. & Debon S. J. J. (2000). Annealing of starch – a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 27, 1-12.

- Tester F. R. & Karkalas J., Qui X., (2004). Starch- composition, fine structure and architecture. *Journal Cereal Science*, 39, 151-165.
- Tomita Y., Sugimoto Y., Sakamoto S., & Fuwa H. (1981). Some properties of starches of grain amaranths and several millets. *Journal of Nutritional Science Vitaminol.* 27, 471–484.
- Torres J., González –Morelo K. J. & Acevedo C. D. (2015), Análisis de perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *ReCiTelA.* 14(2), 63-75.
- Wankhede D.B., Gunjal B.B., Sawate R.A., Patil H.B., Bhosale M.B., Gahilod A.T., & Walde S.G. (1989). Studies on isolation and characterization of starch from Rajgeera grains (*Amaranthus Paniculatus Lin*). *Starch.* 41, 167–171.
- Whistler R.L. & Daniel J. R. (1984). Molecular structure of starch. Chemistry and technology. New York. Academic Press.
- Williams T. & Pullen G. (2007). Chapter 3: Functional Ingredients in Technology of Breadmaking (2^a ed.). Reino Unido. Springer.
- Witczak M., Ziobro R., Juszczak L. & Jaroslaw K. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *Journal of cereal Science.* 67, 46–57.
- Wu H. X. & Corke H. (1999). Genetic diversity in physical properties of starch from a world collection of *Amaranthus*. *Cereal Chemistry Journal.* 76, 877–883.
- Xu Y., Miladinov V., Hanna M.A. (2004). Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry*, 81, 735-740.
- Yanez G.A., Messinger J.K., Walker C.E. & Rupnow, J.H. (1986). *Amaranthus hypochondriacus*: Starch isolation and partial characterization. *Cereal Chemistry Journal.* 63, 273–276.
- Zhao J.G. & Whistler R.L. (1994). Isolation and characterization of starch from amaranth flour. *Cereal Chemistry Journal* 71, 392–393.
- Zhu F. (2017). Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57(2), 313-325.

RESUMEN

EFFECTO DE LA ACETILACIÓN SOBRE LA FUNCIONALIDAD DE ALMIDÓN DE AMARANTO PARA USOS EN ALIMENTOS

El almidón es uno de los componentes de muchos alimentos, tiene una amplia gama de funciones, juega un papel importante al ser parte de los constituyentes de textura y estructura, sin embargo, los almidones nativos presentan desventajas que reducen su aplicación, que pueden ser superadas mediante modificaciones químicas. Se aislaron almidones nativos a partir de grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) variedad revancha, y se modificaron, se determinó la composición química del almidón, contenido de amilosa, tamaño de partícula y características funcionales (Capacidad de retención de agua, índice de solubilidad, poder de hinchamiento y capacidad de retención de aceite), para evaluar su comportamiento después de la modificación. Se encontró 5.5 % de amilosa, con un tamaño de partícula $D_{[3,2]} = 3.38 \mu\text{m}$, se obtuvieron almidones con 0.64% de grupos acetilo y un grado de sustitución de 0.24%. Se observó que a temperaturas de 60 y 70 °C se mejoró la capacidad de retención de agua, el índice de solubilidad aumentó a 60 y 90 °C y el poder de hinchamiento disminuyó a partir de los 70 °C, se encontró que el almidón acetilado retiene $1.55 \pm 0.07 \text{ mL}$ de aceite $\cdot \text{g}^{-1}$. La temperatura de gelatinización del almidón acetilado fue de 62.5 °C y la viscosidad máxima de $0.7285 \pm 0.020 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Palabras clave: Capacidad de retención, solubilidad, hinchamiento.

ABSTRACT

ACETYLATION EFFECT ON THE AMARANTH STARCH FUNCIONALITY FOR THE FOOD USE

Starch is one component in many foods, it has a wide range of function and plays an important role in the texture and structure of foods, however, a native starch presents disadvantage which reduce their application on foods, such disadvantages can be overcome through chemical modifications. Native starches were isolated and chemically modified from amaranth grains (*Amaranthus hypochondriacus* revancha variety), chemical composition, amylose content, particle size and functional characteristics (water holding capacity, solubility index, swelling power, and oil retention capacity), were carried out in order to evaluate their performance after chemical modification. The findings showed 5.5 % amylose content, particle size $D_{[3,2]} = 3.38 \mu\text{m}$, 0.64 % acetyl groups in starch and 0.24 substitution degree on the starch. At 60 and 70 °C water holding capacity was found to improve, solubility index increased at 60 and 90 °C, and the swelling power decreased from 70 °C, the acetylated starch held 1.55 ± 0.07 oil $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. Gelatinization temperature of the acetylated starch was 62.5 °C and the maximum viscosity was 0.7285 Pa·s.

Keys words: Capacity retention, solubility, swelling.

CAPÍTULO 3: EFECTO DE LA ACETILACIÓN SOBRE LA FUNCIONALIDAD DE ALMIDÓN DE AMARANTO PARA USOS EN ALIMENTOS

3.1 Introducción

El almidón tiene múltiples aplicaciones en la industria, sin embargo, la naturaleza hidrófila del almidón en forma nativa puede presentar algunas limitaciones para cierto tipo de procesamiento (Bartz, Madruga, Klein, Pinto y Días, 2012).

En los almidones modificados se ha cambiado su estructura química repercutiendo en sus propiedades funcionales. Con la acetilación del almidón se logra modificar la capacidad de retención de agua (CRA), aumentar la estabilidad al congelamiento, mejorar la capacidad de dispersión, incrementar la resistencia a la retrogradación (López-Soto, 2002).

El contenido de almidón de los granos del genero *Amaranthus* varía entre 55 y 60 %. Presenta características distintivas y únicas como el tamaño pequeño de granulo, estabilidad a la congelación y resistencia a la retrogradación en comparación con los almidones de otras fuentes, esto hace que sea un producto de interés debido a sus posibles aplicaciones en la industria alimentaria (Villarreal, Ribotta e Iturriaga, 2013).

Considerando el potencial de uso del almidón de amaranto, este estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de la acetilación en las propiedades físicas y químicas del almidón.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Materiales

Los granos de amaranto utilizados (*Amaranthus hypochondriacus variedad revancha*) fueron cosechados en Huichapan Hidalgo. Se utilizaron los siguientes reactivos: Hidróxido de potasio (KOH, Laboratorios LAITZ, S.A., México, DF), alcohol etílico 96° (Mena S.A. de C. V., México D.F), Ácido clorhídrico glacial (Laboratorios LAITZ, S.A., México), Hidróxido de sodio (Meyer, México D.F.), anhídrido acético (J. T. Baker, Xalostoc, México), amilosa de papa (Sigma-Aldrich, U.S.A.) , Amilopectina de maíz (Sigma-Aldrich, Germany), Ácido acético glacial (Laboratorios LAITZ, S.A., México), Anhídrido acético (J.T. Baker, México).

3.2.2 Extracción de almidón nativo

El almidón fue extraído con agua destilada mediante la metodología usada por Medina *et al.*, (2010), con algunas modificaciones, los granos de amaranto fueron cernidos para retirar impurezas y remojados en agua destilada por 1 hora, después de esto fueron molidos en una licuadora (Oster 465-15, México) durante 3 minutos, de esto se obtuvo una lechada que posteriormente fue filtrada a través de una tela muselina.

El residuo retenido por la tela nuevamente fue molido en la licuadora (tres veces más). La lechada fue centrifugada a 6500 rpm por 10 min, a 6 °C en una centrifuga (5810R, Eppendorf, Hamburgo, Alemania), el sobrenadante fue eliminado y la capa grisácea formada en la parte superior fue retirada cuidadosamente con una espátula. El sedimento se lavó con agua destilada y se volvió a centrifugar a 6500 rpm por 10 min, a 6 °C, retirando nuevamente la capa grisácea formada en la parte superior (estos lavados se realizaron hasta que ya no se formará esta capa grisácea). Posteriormente se secó en una estufa con aire forzado (HCF-62, Riossa Digital, Puebla, México) a 40 °C durante 24 horas y almacenado.

3.2.3 Caracterización química del almidón nativo

El análisis químico proximal de almidón se realizó de acuerdo a la metodología descrita por la AOAC (1998). Los parámetros que se determinaron fueron:

- Humedad: mediante el secado de una muestra en un horno y su determinación por diferencia de peso entre el material seco y húmedo.
- Cenizas: mediante la calcinación, considerando como el contenido de minerales totales o material inorgánico en la muestra.
- Proteínas: mediante el método de Kjeldahl, mismo que evalúa el contenido de nitrógeno total en la muestra, después de ser digerida con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador.
- Extracto etéreo: extraído con éter de petróleo y evaluadas como porcentaje del peso después de evaporar el solvente.

3.2.4 Tamaño de partícula

Fue medido usando un analizador de tamaño de partícula de dispersión de luz láser (Masterziser 3000, Malvern, Inglaterra), de acuerdo con el método descrito por Sogi, Oberoi y Malik (2010). Se realizó una solución de almidón al 1 % con agua destilada, con un índice de refracción de 1.335, la muestra fue colocada en la unidad de dispersión (Hidro EV) hasta alcanzar el 15-20 % en el índice de obscuración, estableciendo una velocidad de la bomba de 1800 rpm. Se registraron cinco exploraciones para cada muestra. El tamaño de partícula se reportó mediante su diámetro medio superficial, cuya fórmula se observa en la ecuación 1:

$$D_{[32]} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n z_i d_i^2} \dots\dots\dots(1)$$

Donde d_i es el diámetro volumétrico superficial

z_i es el diámetro de gotas con diámetro D_i

3.2.5 Contenido de amilosa y amilopectina

Para la determinación del contenido de amilosa / amilopectina se utilizó la técnica ISO 6647 (1987), que establece su determinación mediante una curva estándar preparada de la siguiente manera:

Se pesaron 100 mg de amilosa y 100 mg de amilopectina en matraces volumétricos de 100 mL, a cada matraz se agregó 1 mL de etanol al 95 %, y 9 mL de NaOH 1N, se tapó y se dejó a temperatura ambiente 24 horas, se aforó con agua destilada.

Posteriormente se realizó la curva de calibración con los valores de concentración del Cuadro 7.

Cuadro 7. Concentración de amilosa y amilopectina para la elaboración de la curva estándar.

Amilosa (%)	Amilosa (mL)	Amilopectina (mL)	NaOH 0.009 N (mL)
0	0	18	2
1.5	.3	17.7	2
2.5	.5	17.5	2
5	1	17	2
10	2	16	2
15	3	15	2
20	4	14	2
25	5	13	2

En un matraz volumétrico de 100 mL, se agregaron 50 mL de agua destilada y se tomaron 5 mL de cada punto de la curva estándar, 1 mL de ácido acético 1N y 2 mL de solución de yodo al 2 %, se mezcló y se aforó. Cada matraz se mantuvo en oscuridad durante 20 min para leer la absorbancia a una longitud de onda de

620 nm. El contenido de amilosa se obtuvo a partir la siguiente ecuación:

$$\% \text{ amilosa} = 0.0126x + 0.0063 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

x= absorbancia

El contenido de amilopectina se obtuvo mediante la ecuación 2:

$$\% \text{ amilopectina} = 100 - \% \text{ amilosa} \dots \dots \dots (3)$$

3.2.6 Modificación química del almidón

La modificación de almidón se realizó con el método utilizado por Carrascal (2013), con algunas modificaciones, 40 g de almidón nativo se colocaron en un vaso de precipitado de 500 mL, y se adicionaron 100 mL de agua destilada, se mezclaron con ayuda de un agitador, manteniendo la temperatura a $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ mediante un baño frío. Posteriormente se ajustó el pH de la muestra entre 8.0 - 8.5, adicionando una solución de NaOH al 6 %, el cual además actuó como catalizador.

Se adicionaron lentamente 5 mL de anhidro acético glacial, manteniendo el pH entre 8.0 - 8.5 con NaOH al 6 %. Se dejó reaccionar el sistema por 10 min y se disminuyó el pH hasta 4.5, adicionando una solución de HCl 0.5 N. El almidón modificado obtenido fue lavado 2 veces con agua destilada y centrifugado a 6000 rpm por 10 minutos, separando el almidón del agua, Finalmente el almidón modificado fue lavado con etanol absoluto y centrifugado a 6500 rpm por 10 minutos, se decantó y secó en una estufa de aire forzado en bandejas a 40°C por 24 horas.

3.2.7 Grado de sustitución (DS) y el porcentaje de grupos acetilo (% AC)

El porcentaje de grupos acetilo (% Ac) y el grado de sustitución (DS) se determinaron mediante valoración, según lo propuesto por Würzburg (1986). Se añadió 1 g de cada muestra a frascos de vidrio con tapa y 50 ml de alcohol etílico

al 75 %. Las muestras se calentaron en un baño de agua a 50 ° C durante 30 min y, después de enfriado, se añadieron 40 ml de KOH 0.5 N y se mantuvo bajo agitación a 200 rpm durante 72 horas. Se valoró con HCl 0.5 N, utilizando fenolftaleína como indicador. La solución neutralizada se agitó durante 2 horas y se tituló el exceso de álcali lixiviado de la muestra. Se realizó una muestra en blanco con almidón nativo.

Ecuación 3:

$$\% \text{ Ac} = \frac{(\text{mL blanco}) - (\text{mL muestra}) * \text{N de HCL} * 0.043 * 100}{\text{gramos de muestra}} \dots\dots\dots(4)$$

0.043= miliequivalentes del grupo acetilo

$$\text{D. S.} = \frac{162 * \% \text{ acetil}}{4300 - (42 * \% \text{ acetil})} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

% Ac= Porcentaje de grupos acetilo

D.S.= Grado de sustitución

162=Peso molecular de la unidad de anhídrido glucosa

4300 = 100 * peso molecular del grupo acetilo

42= peso molecular del grupo acetilo -1

3.2.8 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier

Los espectros de IR por transformada de Fourier de los almidones nativos y acetilados fueron obtenidos mediante el método de Pushpamalar, Langford, Ahmad y Lim (2006). La muestra seca se prensó para obtener una pastilla y se analizó en un espectrómetro (Cary 630 FTIR). Cada espectro fue analizado en un intervalo de resolución de 400 - 4000 cm⁻¹.

3.2.9 Capacidad de retención de agua (CRA), Índice de solubilidad (IS) y Poder de hinchamiento (PH)

Estas características se determinaron mediante el método propuesto por Anderson *et al.*, (1969), en tubos de centrifuga tarados previamente, se prepararon 40 mL de suspensión de cada almidón al 1% (p/v), con agua destilada a 30 °C. Los tubos se llevaron a un baño con hasta alcanzar 60, 70, 80 y 90 °C, agitándolos a los 10 min después de haber iniciado el calentamiento, se mantuvieron durante 30 min en cada temperatura. Posteriormente, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y fueron centrifugados a 6500 rpm durante 15 min, se decantó el sobrenadante y se colocó en cajas Petri (a peso constante), y se secó a 70 °C por 12 horas para pesarlos posteriormente, los tubos de centrifuga con gel fueron pesados y después se aplicaron las siguientes formulas:

$$CRA = \frac{Pg (g)}{Pm (g)} \dots\dots\dots(6)$$

$$IS = \frac{PSS (g)}{Pm(g)} * 100 \dots\dots\dots(7)$$

$$PH = \frac{Pg (g)}{Pm(g)-PSS (g)} \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

Pg: peso del gel

Pm: peso de la muestra de almidón

3.2.10 Capacidad de retención de aceite

Fue determinada por el método propuesto por Beuchat, (1977), se tomó 1 g de almidón y se mezcló con 10 mL de aceite de maíz en un vórtex durante 30 segundos. Las muestras se dejaron en reposo 30 minutos a temperatura ambiente, posteriormente se centrifugaron a 7000 rpm durante 15 minutos, se

midió el volumen del sobrenadante obtenido, en una probeta. La capacidad de retención de aceite se reporta en $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

3.2.11 Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del almidón

El comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura, y la temperatura de gelatinización fueron determinados con un reómetro de esfuerzo controlado por Anton Paar Physica MCR 300 (Gaz, Austria), equipado con geometría de platos paralelas, se prepararon suspensiones de muestra (10 %), la muestra fue colocada en el sistema Peltier Viscotherm VT2, Paar Physica (Gaz, Austria), y se aplicó parafina líquida a las superficies expuestas de la muestra para evitar la evaporación. Se calentaron las suspensiones de la muestra de 20 °C a 90 °C a una velocidad de $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, luego se mantuvieron a 90 °C durante 10 min y después fueron enfriadas a 20 °C a una velocidad de $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Composición química de los almidones nativos

El método utilizado para la extracción de almidón a partir del grano de amaranto permitió obtener un rendimiento de $23 \pm 5.8\%$, este porcentaje es menor a lo reportado por Uriyapongson y Rayasduarte, (1994) que fue de 50.6- 58.7 %, esto se debe al método de extracción utilizado.

La extracción del almidón de amaranto presenta varios inconvenientes debido a la sedimentación conjunta de proteínas y fibras muy finas junto con el almidón, por otro lado, la pequeña dimensión de sus gránulos provoca importantes pérdidas. (Villarreal *et al.*, 2013). Comúnmente se usan reactivos como NaOH, HgCl_2 , SO_2 , sin embargo, estos métodos generan residuos en el almidón y modificaciones en la estructura.

Los tratamientos alcalinos a concentraciones superiores a 1 g/100 g de NaOH, extracción enzimática o la combinación de ambos permiten obtener un buen

rendimiento, recuperación del almidón y bajos contenidos de proteínas, sin embargo, generan efluentes indeseables (tanto alcalinos como salinos), y su eliminación genera costos adicionales.

Por otro lado para la extracción enzimática se requieren tratamientos largos (más de 24 horas) para la eliminación de proteínas, fibras y liberación del almidón, esto aumenta costos, implica problemas microbianos que requieren el uso de conservantes tóxicos (Villarreal *et al.*, 2013). Por lo tanto, se optó por un método que no ocasionará daño o residuos en el almidón nativo.

El uso de proteasas, también incrementa costos y además en ocasiones los tiempos de extracción se prolongan, incrementando también los costos de producción. Estos métodos pueden permitir obtener mayor rendimiento, sin embargo, incrementan costos y aumentan los tiempos de extracción. La composición química de los almidones extraídos de *Amaranthus hypochondriacus* variedad revancha, se muestra en el Cuadro 8, se observa que la fracción proteína fue el que tuvo mayor porcentaje en la composición del almidón.

Cuadro 8. Análisis proximal del almidón de amaranto nativo.

Fracción	g / 100
Humedad (B.H)	5.7
Proteína cruda	7.26
Extracto etéreo	0.54
Fibra cruda	0.18
Cenizas	1.52

B.H. Base húmeda.

El contenido de humedad en el almidón nativo fue menor a lo reportado por Xia Lia, Liao, Zhang, Zheng y Kang (2015) quienes encontraron 12.13 % de humedad en almidón de *A. cruentus* L. K112. El agua normal de hidratación en los

almidones depende de la fuente y el procedimiento de obtención, del proceso de secado y de la humedad relativa del medio (Guizar *et al.*, 2008).

Xia *et al.*, (2015) reportaron 0.29 % de proteína, sin embargo, por el método utilizado para la extracción del almidón no se eliminaron completamente obteniendo un 7.26 %.

Yanez *et al.*, 1986, reportaron un 0.39 % de lípidos en el almidón obtenido, que es menor a lo obtenido con el método de extracción utilizado. De acuerdo con Zhu (2017), el contenido de lípidos y proteínas en bruto en los gránulos de almidón parece depender principalmente de los métodos de aislamiento. El origen botánico también es decisivo para la presencia de componentes no almidonados de los gránulos de almidón, que afectan las propiedades físico-químicas y funcionales del almidón (Pérez y Bertoft, 2010).

El contenido de fibra cruda fue menor a lo obtenido por Calzetta (1999), quien obtuvo un 0.73 %, en cuanto a las cenizas obtuvo un 3.4 %, que es mayor al porcentaje obtenido en la investigación, esto puede depender de la variedad de almidón, y de los efluentes o residuos que se retienen durante el método de extracción.

3.3.2 Contenido de amilosa y amilopectina

La variación genética en el contenido de amilosa de almidones de amaranto puede proporcionar excelentes oportunidades para diversificar las propiedades en diferentes aplicaciones (Zhu, 2015).

Para la variedad estudiada, el porcentaje de amilosa fue de 5.5 %, sin embargo, la variación genética en el amaranto puede influir en el contenido de amilosa, encontrando para *Amaranthus hypochondriacus* porcentajes desde 0.14 hasta 10.6 %, aunque esta variación también puede deberse al método o técnica de medición (por ejemplo el uso de la enzima concavalina A, que precipita la

amilopectina y se cuantifica la amilosa en el sobrenadante) (Zhu, 2015). El contenido de amilosa es un factor importante que afecta el poder de hinchamiento, la solubilidad y la propiedad formadora del gel (Choi, Kim y Shin, 2004).

En la Figura 8 se muestra la curva de calibración y la ecuación obtenida para la determinación del contenido de amilosa en el almidón nativo.

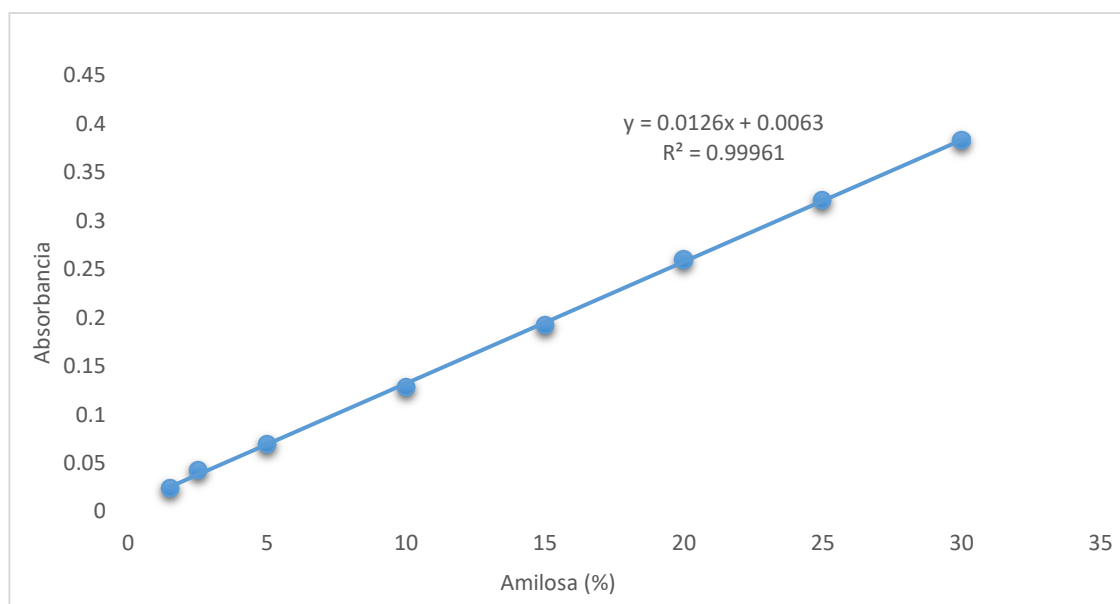


Figura 8. Curva de calibración para la determinación del contenido de amilosa.

3.3.3 Tamaño de partícula

El tamaño, la forma y la superficie de los gránulos dependen principalmente del origen botánico, estos son decisivos para el tamaño de partícula, área de contacto, propiedades de flujo y absorción (Crittenden *et al.*, 2001; Huber y BeMiller, 2001; Singh *et al.*, 2003).

En la Figura 9, se muestra la distribución del tamaño de partícula del almidón nativo, se observa una gráfica monomodal, se encontró un diámetro volumétrico superficial $[D_{3,2}] = 3.38 \mu\text{m}$.

Kong *et al.*, (2009), encontraron un diámetro de 1.09 μm en *A. hypochondriacus*, mucho menor al encontrado en esta investigación, esto se puede atribuir a las proteínas asociadas al almidón se encuentran en la superficie del gránulo, estas proteínas pueden afectar la carga superficial del gránulo, lo cual influye directamente en la velocidad de hidratación, velocidad de hinchamiento y la gelatinización del mismo (Guizar *et al.*, 2008).

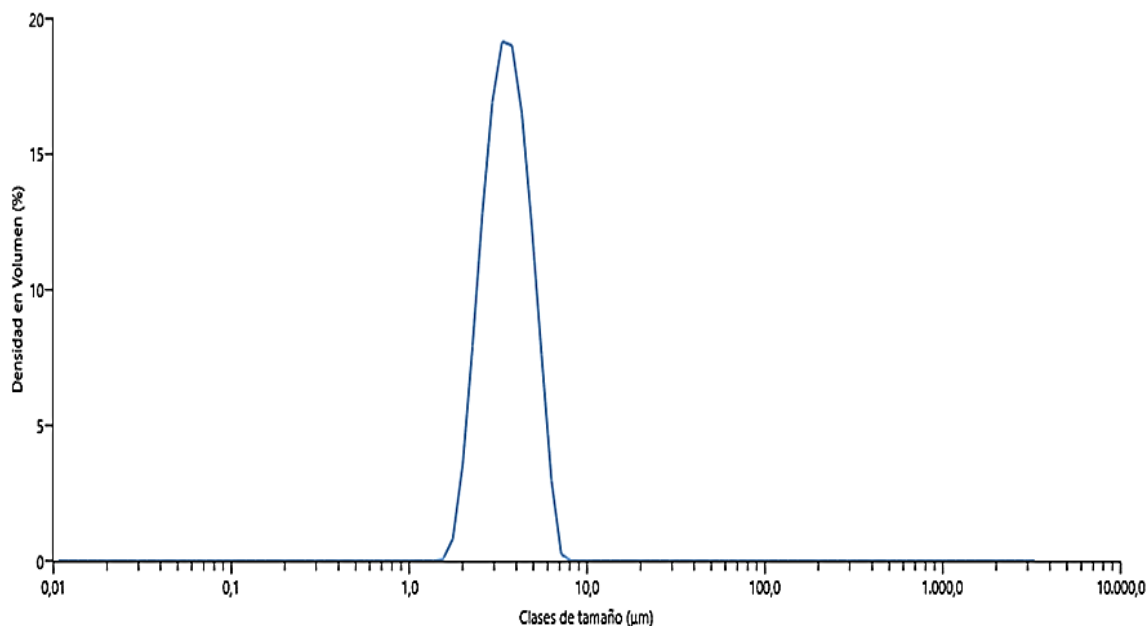


Figura 9. Distribución del tamaño de partícula del almidón nativo.

Xia *et al.*, (2015), encontraron valores de tamaño de partícula para *A. cruentus* L. K112 desde 2.91-22.93 μm , los valores obtenidos se encuentran dentro de los valores reportados. Esta variación puede atribuirse al origen biológico, la bioquímica del amiloplasto, la fisiología de las plantas y método de extracción.

3.3.4 Modificación química del almidón de amaranto

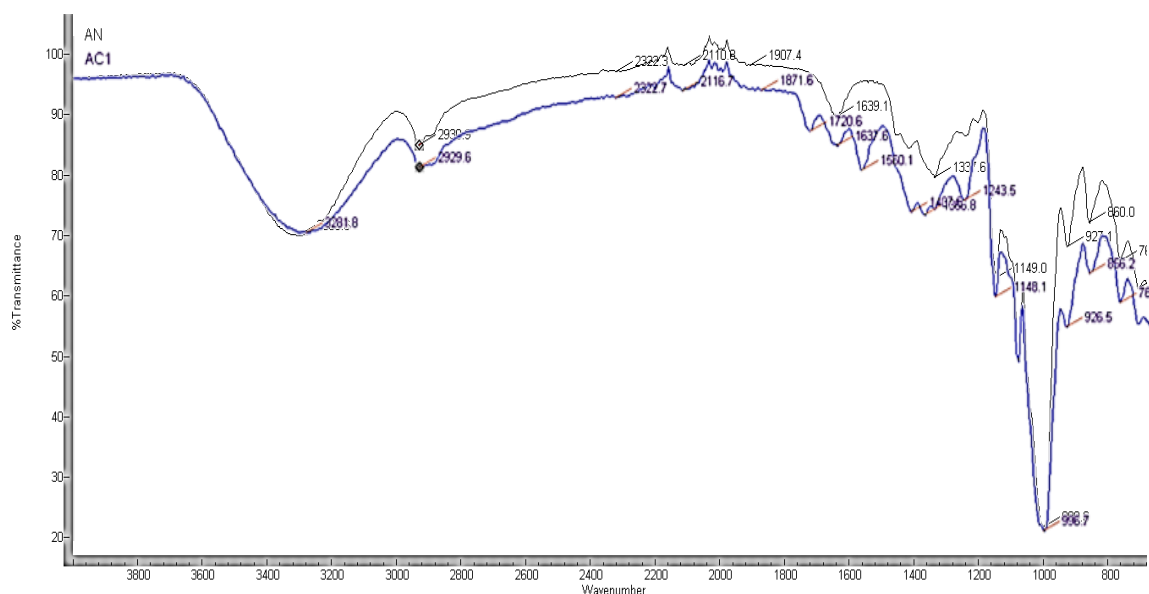
Se obtuvieron almidones acetilados con 0.64 % de grupos acetil (% Ac) y un grado de sustitución (D.S.) 0.024 %, lo que indica que es el promedio del número

de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón. El D.S. y % Ac fueron muy pequeños, sin embargo, el almidón acetilado tiene aplicaciones reguladas por sus características como el grado de acetilación y el grado de sustitución. La FDA (Food and Drug Administration EE.UU.) recomienda un porcentaje de grupos acetilo de menos de 2.5 g / 100 g (Colussi *et al.*, 2015).

El % Ac y D. S. dependen del tipo de reactivo utilizado, la concentración, el pH, la presencia de un catalizador, el tiempo de reacción, el origen botánico, así como las características de tamaño y estructura de los gránulos de almidón (Colussi, Mello, Zanella, Gutkoski, Da Rosa y Guerra, 2015).

3.3.5 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier

En la Figura 10 se muestra el análisis de FTIR que se efectuó para conocer el grado de acetilación que se tuvo en el almidón nativo de amaranto.



Almidón nativo (gráfica Negro) y Almidón acetilado (gráfica azul).

Figura 10. Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) de almidón nativo de amaranto.

El espectro FTIR del almidón de amaranto muestra que si se presentaron cambios en la estructura del almidón acetilado con respecto al nativo. Cuando se produce la reacción de acetilación en la molécula de almidón, se observa una disminución en las señales que corresponden a vibraciones por estiramiento ($3000-3900\text{ cm}^{-1}$) y vibraciones por flexión de los grupos OH, debido a la introducción de grupos acetilo en el almidón, corroborando que la acetilación se efectuó en las muestras analizadas. Esta señal es característica del módulo de vibraciones en los grupos carboxilo presentes en el almidón acetilado.

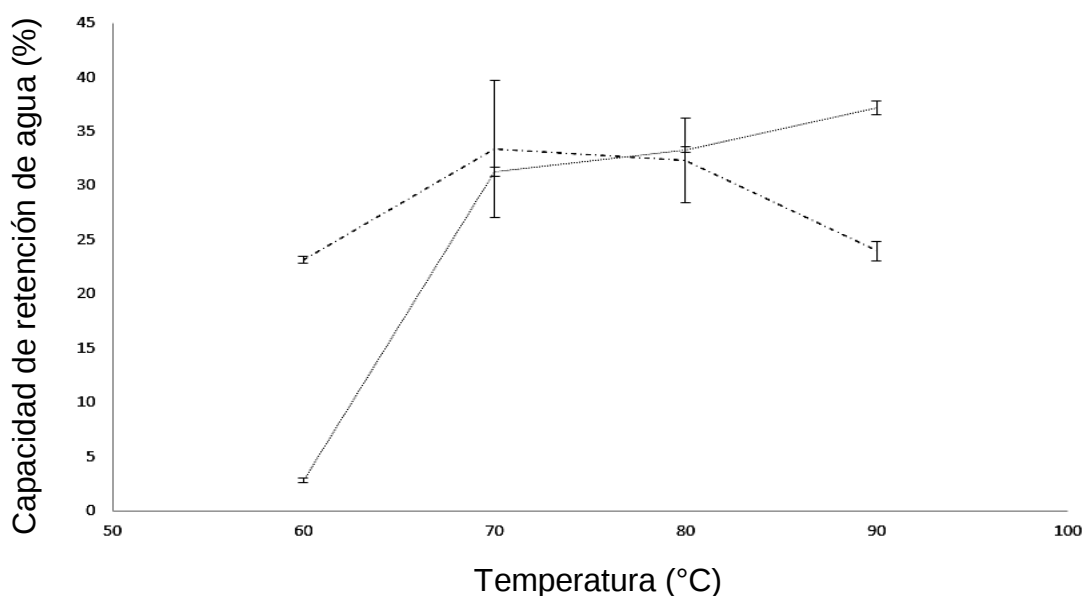
Los almidones nativos mostraron señales que corresponden a la elongación (estiramiento) de los principales grupos característicos de la molécula de almidón. Se observan que en el almidón acetilado a partir de la señal 2930 cm^{-1} , los grupos acetato se muestran entre las señales 1320 cm^{-1} a 1260 cm^{-1} , en el almidón acetilado se encontraron señales en el rango 1366 cm^{-1} a 1243 , que coinciden con las señales de los estiramientos de los grupos carbonilo.

3.3.6 Capacidad de retención de agua (CRA), Índice de solubilidad (IS) y Poder de hinchamiento (PH)

Capacidad de retención de agua

El comportamiento del almidón en una suspensión acuosa depende de la temperatura y de su concentración. Los almidones son poco solubles en agua fría, la cantidad de agua absorbida dependerá del contenido de humedad del medio que lo rodea. El almidón absorbe agua hasta alcanzar el equilibrio con el medio circundante, el proceso es reversible cuando el agua es fría, hace que el gránulo presente un hinchamiento incrementando su diámetro hasta un 10 % (Seib y Stearns, 1972).

En la Figura 11 se observa que cuando se alcanza la temperatura de 60 °C el almidón acetilado muestra mejor CRA comparado con el almidón nativo, esta CRA se mantiene a temperaturas de 70 y 80 °C, en este rango de temperaturas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre almidones, sin embargo al alcanzar los 90 °C su CRA disminuye, en el caso de los almidones nativos alcanzan su mayor CRA a los 90 °C.



..... Almidón Nativo, -•- Almidón Acetilado. Las barras en cada punto muestran la desviación estándar de los datos.

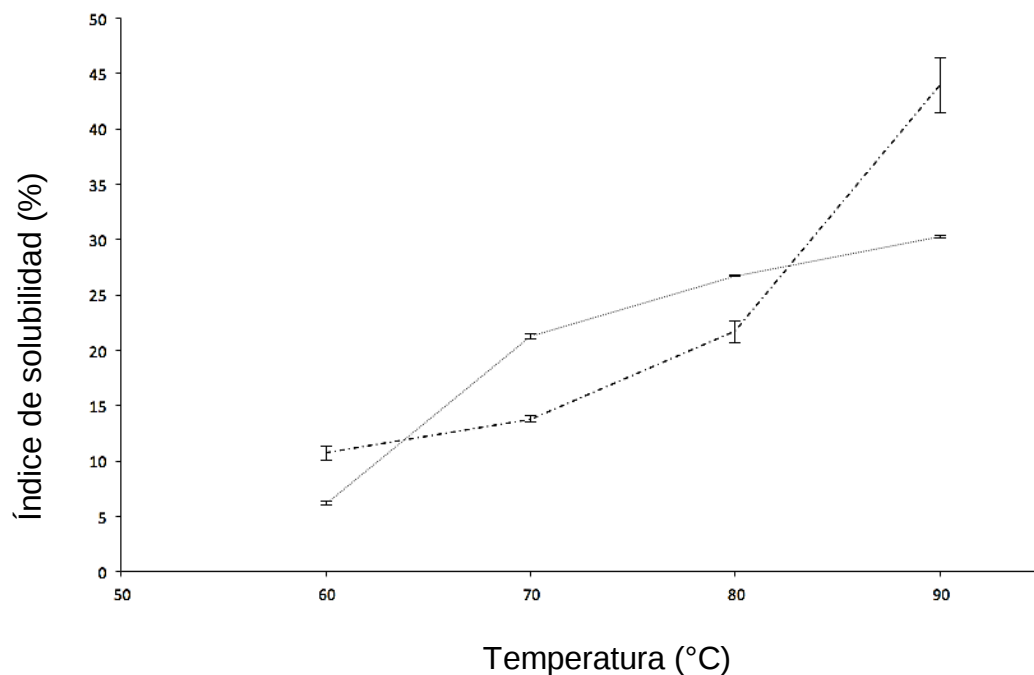
Figura 11. Efecto de la temperatura en la Capacidad de retención de agua, en el almidón nativo y acetilado.

De manera general los almidones modificados por ácidos son obtenidos por el tratamiento ácido del almidón nativo a una temperatura menor al punto de gelatinización. Los tratamientos hidrolizan los puentes glucosídicos en las regiones amorfas y rompen el polímero, de modo que los gránulos absorben el agua rápidamente (French, 1984). En agua caliente la absorción de agua está determinada por la fuerza de unión de la estructura del gránulo de almidón, que

depende del grado de asociación molecular entre la amilosa y la amilopectina, sin embargo, esta estructura presenta un límite de elasticidad, y por ello los gránulos poseen una limitada capacidad para absorber agua caliente con un hinchamiento reversible. Este proceso es irreversible cuando los puentes de hidrógeno que unen las estructuras son rotos (Rasper, 1980).

Índice de solubilidad

En la figura 12 se muestra el efecto que tiene la temperatura en el índice de solubilidad de los almidones obtenidos, el índice indica la cantidad de sólidos disueltos en el agua. Cuando el almidón se somete a un exceso de este líquido y está asociado con la presencia de moléculas de almidón solubles, la variación en la capacidad de ligar o fijar agua obedece probablemente a las diferencias en la proporción de zonas amorfas y zonas cristalinas dentro del gránulo de almidón.



. Almidón Nativo, -•- Almidón Acetilado. Las barras en cada punto muestran la desviación estándar de los datos.

Figura 12. Efecto de la temperatura en el Índice de solubilidad del almidón nativo y acetilado.

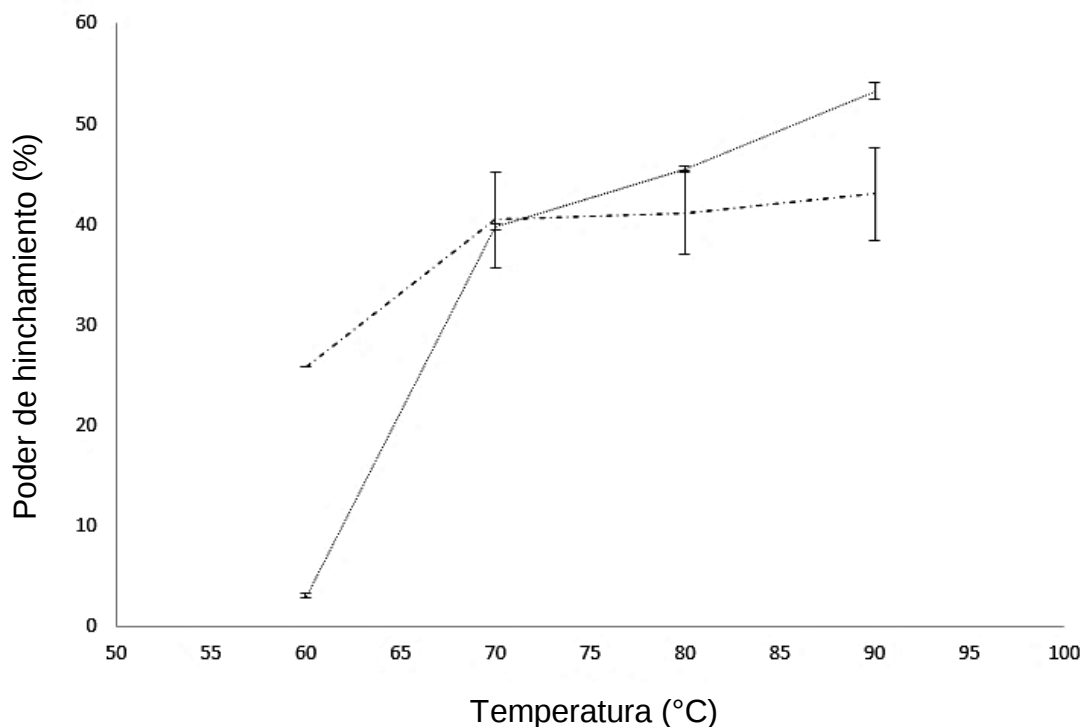
La zona amorfa presenta una mayor capacidad de absorción de agua con respecto a la región cristalina (Colonna, Doublier, Melcion, De Monredon, Mercier, 1984).

Al realizar la comparación de medias se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los almidones. Con la modificación química se mejoró la solubilidad de los almidones a temperaturas de 60 y 90 °C, sin embargo cuando alcanzan los 70 - 80 °C, esto puede atribuirse al rompimiento de los gránulos cuando alcanzan su temperatura de gelatinización (Figura 12), posteriormente hay un aumento del IS, este aumento puede deberse a una reorganización estructural (Mello *et al.*, 2015). Los ácidos orgánicos reaccionan con el almidón formando enlaces y provocando alguna hidrólisis lo que se manifiesta por la mayor solubilidad comparado con el almidón nativo, la hidrólisis es realizada solo en las regiones amorfas preservando las regiones cristalinas (Flores, 2004).

Poder de hinchamiento

En la Figura 13 se muestra el poder de hinchamiento de los almidones obtenidos, con respecto a la temperatura, se observa que la acetilación redujo el poder de hinchamiento, el almidón acetilado presentó una ligera disminución en comparación con el almidón nativo.

Los gránulos de almidón no son solubles en agua a temperatura ambiente. Cuando los gránulos secos se mezclan con agua, las regiones amorfas de los gránulos absorben sólo una pequeña cantidad de agua. En exceso de agua, y si la temperatura aumenta, la cantidad de agua absorbida aumenta hasta un punto en el que los gránulos empiezan a hincharse irreversiblemente. Esta hinchazón es principalmente una propiedad de la amilopectina (Tester, 1990).



. Almidón Nativo, -.-.- Almidón Acetilado. Las barras en cada punto muestran la desviación estándar de los datos.

Figura 13. Efecto de la temperatura en el Poder de Hinchamiento de almidón nativo y acetilado.

Sánchez-Rivera, Flores-Ramírez, Zamudio-Flores, González-Soto y Rodríguez-Ambriz, (2010) encontraron este comportamiento en almidones de maíz y banano acetilados, al igual que Mello *et al.*, (2015) y relacionaron el hecho con una menor capacidad de hinchamiento en los almidones debido a la introducción de grupos acetilo voluminosos que confieren hidrofobicidad y pueden disminuir la capacidad de absorción y retención de agua en el almidón.

3.3.7 Capacidad de retención de aceite (Craceite)

La Craceite puede ser importante en algunos alimentos a base de cereales ya que pueden mejorar el sabor y la textura (Ramírez & Pacheco, 2009). Los pequeños gránulos del almidón de amaranto pueden formar agregados con

pequeñas cavidades intersticiales que pueden alojar y transportar materiales como aceites esenciales (Bello- Pérez, 2014).

Cuadro 9. Capacidad de retención de aceite del almidón nativo y acetilado.

Tipo de Almidón	Craceite (g• mL⁻¹)
Nativo	1.20 ± 0.004 ^a
Acetilado	1.31 ± 0.03 ^b

Los promedios en las filas con diferentes superíndices son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$.

En el Cuadro 9 se muestra la capacidad de retención de aceite de los almidones obtenidos, se observa que los almidones acetilados retienen más aceite comparados con los nativos, al realizar la comparación de medias se encontró diferencia estadísticamente significativas entre los tipos de almidón utilizados. La absorción de aceite es la capacidad del almidón seco para unir físicamente la grasa por atracción capilar y es de gran importancia, ya que la grasa actúa como retenedor de sabor y también aumenta la sensación en la boca (Ali, Ahmed, Ahmed y Masoodi, 2014).

3.3.8 Variación de la viscosidad con respecto a la temperatura del almidón

El primer paso en la gelatinización es la interrupción del orden molecular (desordenamiento de los dominios cristalinos) dentro del gránulo y se produce en un intervalo de temperaturas, el agua entra por primera vez en los anillos de crecimiento amorfo y, en cierto grado de hinchamiento, el estrés se transmite a través de las moléculas de conexión de las regiones amorfas a las cristalinas (Debet y Gidley, 2007).

Las moléculas de amilosa comienzan a lixiviar desde los gránulos a medida que se rompen bajo cizallamiento y la viscosidad de la pasta resultante aumenta hasta

un máximo, lo que corresponde al punto en el que los gránulos de almidón están hinchados, pero todavía intactos, es seguido por una disminución en la viscosidad de la pasta, ya que la rotura de los gránulos y las moléculas de almidón se dispersan en la fase acuosa. La velocidad y el grado de hinchamiento y descomposición dependen del tipo y cantidad de almidón, del gradiente de temperatura, de la fuerza de cizallamiento y de la composición de la mezcla, por ejemplo, la presencia de lípidos y proteínas (Debet y Gidley, 2007).

La gelatinización comienza a una temperatura designada (T_o), y cesa a una temperatura denominada (T_c). La hinchazón de los gránulos continúa por encima de la conclusión de la fusión (T_c) de las cristalitas donde comienzan a desarrollarse las propiedades funcionales útiles del almidón, tales como la capacidad de retención de agua y las propiedades reológicas. La temperatura máxima en este rango se denomina (T_p), que se encuentra muy cerca del inicio correspondiente a la temperatura de gelatinización (T_o) coincide con un aumento en la viscosidad del almidón durante la gelatinización (Eliasson y Gudmundsson, 2006; González, Tosi, Ré, Añón, Pilosof y Martínez, 2007).

Para los almidones estudiados se tuvo que las temperaturas de gelatinización comenzaron a los 71.3 °C, que se encuentra dentro del rango encontrado por Singh *et al.*, (2014) para *A. hypochondriacus* $T_p = 68.8 - 79.8$ ° C.

En el Cuadro 10 se muestra la temperatura de gelatinización el caso del almidón acetilado se encontró una temperatura de gelatinización de 62.5 °C, lo que indica que disminuyó con respecto al almidón nativo. Prieto-Méndez *et al.*, (2010) acetilaron almidones de cebada y encontraron que almidones acetilados presentan 6-10 °C menos en la temperatura de gelatinización, lo cual indica que los almidones acetilados se dispersan más fácilmente y por lo tanto la gelatinización ocurre más rápido.

Cuadro 10. Temperatura de gelatinización y viscosidad máxima de los almidones evaluados.

Almidón	Temperatura gelatinización (°C)	Viscosidad (Pa·s)	Viscosidad máxima (Pa·s)
Nativo	71.3	0.00275 ± 0.007 ^a	1.600 ± 14.14 ^a
Acetilado	62.5	0.00112 ± 0.028 ^b	0.7285 ± 0.020 ^b

Los promedios en las filas con diferentes superíndices son significativamente diferentes en $p \leq 0.05$.

La viscosidad máxima fue alcanzada para el caso del almidón nativo después del enfriamiento del gel a los 20 °C, alcanzando valores de 1.600 Pa·s para el almidón nativo y para el almidón acetilado a los 76.2 °C con 0.7285 Pa·s. Los almidones modificados por ácidos se diferencian de los almidones nativos por presentar menos viscosidad de la pasta, mayor relación entre la viscosidad de pasta fría y caliente (Rohwer y Klem, 1984).

En la Figura 14 se muestra el comportamiento de las suspensiones de almidón al 10 %, se puede observar que ocurre un aumento de la viscosidad hasta alcanzar un punto máximo, pero después es seguido por una disminución a un valor mínimo. A medida que disminuye la temperatura, la viscosidad aumenta de nuevo desde el valor mínimo hasta un valor final, que se conoce como retroceso. El tiempo y la viscosidad máxima son indicativos de la capacidad de unión al agua del almidón y de la facilidad con la que se desintegran los gránulos de almidón, mientras que los valores de retroceso más altos se correlacionan usualmente con el contenido de amilosa del almidón (Copeland, Blazek, Salman y Chiming, 2009).

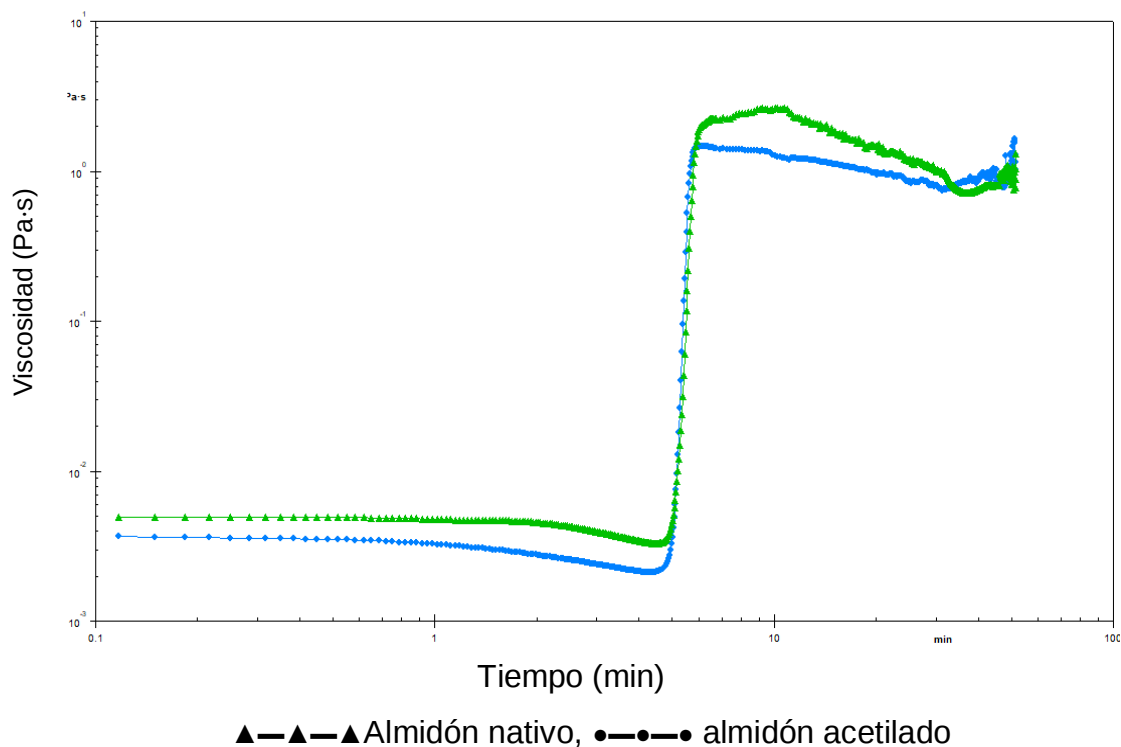


Figura 14. Comportamiento de la viscosidad de suspensiones al 10 % de almidón de amaranto nativo y acetilado durante la modificación de la temperatura.

3.4 Conclusiones

La extracción con agua destilada permitió la obtención de almidón nativo de amaranto, lo cual confiere una alta concentración de proteínas (7.2 %), lo cual puede ser favorable para aprovechar la funcionalidad en el desarrollo de alimentos.

La caracterización del almidón nativo de amaranto permitió conocer la composición química del almidón, encontrando un 5.7 % de humedad, 7.26 % de proteína, 0.54 % de extracto etéreo, 0.18 % de fibra cruda, 1.52 % de cenizas y 5.5 % de amilosa.

Con la incorporación de grupos acetilo al almidón nativo se modificaron las propiedades funcionales del almidón mejorando la Capacidad de retención de agua en los 60 - 70 °C, el poder de hinchamiento a los 60 °C y el Índice de solubilidad a 60 y 90 °C. También se redujo la viscosidad máxima de 1.6 Pa·s a 0.728 Pa·s y la temperatura de gelatinización de 71.3 °C a 62.5 °C. Esto se puede reflejar en términos económicos ya que la utilización del almidón acetilado al requerir menor temperatura para la formación de gel requiere menor cantidad de energía reduciendo de esta manera los costos de producción al incorporarse en los alimentos.

El almidón de amaranto obtenido presenta contenidos de amilosa y amilopectina y composición adecuada para poder utilizarse como ingrediente funcional, en la industria de los alimentos, permitiendo diversificar su uso, con la consecuente mejora de ingresos para los productores de este grano

3.5 Literatura citada

- Ali A., Ahmed W. T., Ahmed W. I. & Masoodi A. (2016). Comparative study of the physico-chemical properties of rice and corn starches grown in Indian temperate climate. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15, 75-82.
- Association A. O. A. C. (1998). Official methods of analysis of AOAC International. Maryland: AOAC International.
- Anderson R., Conway H. F., Pheiser V. F. & Griffin E. L. (1969). Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14, 4-12.
- Bartz J., Madruga K. M., Klein B., Pinto V. Z. & Dias A. R. G. (2012). Pasting properties of native and acetylated rice starches. *Brazilian Journal of Food Technology*. 15, 78-83.
- Bello-Pérez L. A. (2014). El almidón como estabilizador de emulsiones. Academia de Ciencias de Morelos, Consultado en: <http://www.acmor.org.mx/?q=content/el-almidón-como-estabilizador-de-emulsiones> Fecha de consulta 13/11/17.
- Beuchat L. R. (1977). Functional and electrophoretic characteristics of succinylated peanut flour protein. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 25, 258-261.
- Calzetta R. A. N. (1999). Almidón de amaranto: Obtención y evaluación de sus características fisicoquímicas (Tesis de maestría en bromatología y tecnología de la industrialización de alimentos). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Carrascal S. J. J. (2013). Acetilación de almidón de *Arracacia xanthorrhiza* y evaluación de su aplicación como posible auxiliar farmacéutico (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia). Consultada en <http://www.bdigital.unal.edu.co/11936/1/juanjosecarrascalsanchez.2013.pdf>.
- Choi H., Kim W. & Shin M. (2004). Properties of Korean Amaranth Starch Compared to Waxy Millet and Waxy Sorghum Starches, *Starch/Stärke* 56, 469–477.

- Colonna P., Doublier J. L., Melcion J. P., de Monredon F. y Mercier C. (1984). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch, I. Physical and macromolecular modifications. *Cereal Chemistry*. 61, 538-543.
- Colussi R., Mello E. H. S. L., Zanella B. J., Gutkoski L. C., Da Rosa Z. E. & Guerra D. A. R., (2015), Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. *LWT - Food Science and Technology* 62, 1076-1082.
- Copeland L., Blazek J., Salman H. & Chiming T. M. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids* 23, 1527-1534.
- Crittenden R., Laitila A., Forssell P., Mättö J., Saarela M., Mattila-Sandholm T., Myllärinen P. (2001). Adhesion of bifidobacteria to granular starch and its implications Probiotic technologies. Application enviromental microbiological. 67 (8), 3469-3475.
- Debet M. R., & Gidley M. J. (2007). Why do gelatinized starch granules not dissolve completely? Roles for amylose, protein, and lipid in granule “ghost” integrity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 4752–4760.
- Eliasson A. C. & Gudmundsson M. (2006). Starch: Psicochemical and Functional Aspects In *Carbohydrate in Food*. (2ª ed.) Taylor & Francis Group, Boca Ratón-Florida. 391-470.
- Flores F. S. (2004). Obtención de almidón con tamaño de partícula reducido mediante pulverizado mezclado con alta energía (Tesis de Maestría. Departamento de Tecnología. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional) México. Disponible en: http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/10621/1/PTA_M_20040615_001.pdf Fecha de consulta 11/11/17.
- French D. (1984). Organization of starch granules en starch: Chemistry and Technology. (2ª Ed.). Academic Press Inc. London. 183-247.
- González R., Tosi E., Ré E., Añón M. C., Pilosof A. M. R. & Martinez K. (2007), Amaranth starch-rich fraction properties modified by high-temperature heating *Food Chemistry* 103,927–934.
- Guerra-DellaValle D., Bello-Pérez L.A., González-Soto R. A., Solorza-Feria J. & Arámbula-Villa G. (2008). Efecto del tiempo de reacción en la acetilación

de almidón de plátano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 7(3), 283-291.

Guizar M. A., Montañez S. J. L., García R. I., (2008). Parcial caracterización de nuevos almidones obtenidos del tubérculo de camote del cerro (*Dioscorea* spp). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 9(1), 81-88.

Hizukuri S. (1991). Properties of hot-water-extractable amylose. *Carbohydrate Research* 217, 251-253.

Huber K. C. & BeMiller J. N. (2001). Location of sites of reaction within starch granules. *Cereal Chemistry*. 78 (2), 173-180.

Jekle M., Mühlberger K., Becker T., (2016). Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems. *Food Hydrocolloids* 54, 196-201.

ISO. (1987). Determination de la teneur en amylose. ISO 6647 .International Organization for Standarization. Suiza.

Kong X. Bao. & Corke H. (2009). Physical properties of *Amaranthus* starch. *Food Chemistry*. 113, 371-376.

Medina C., Paredes A., Rodríguez María E., Moreno M., Belén-Camacho D., García D. & Ojeda C. (2010). Evaluación de métodos de extracción de almidón a partir de cotiledones de mango. *BIOAGRO* 22, 68-69.

Mello E. S. L., Colussi R., Zanella P. V., Bartz J., Radunz M., Villarreal C. N. L., Guerra D. A. R. & Da Rosa Z., E. (2015). Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches *Food Chemistry* 168: 247-256.

Paredes-López O., Schevenin M. L., Hernández- López D. & Cárevez-Trejo A. (1989). *Amaranth Starch- Isolation and partial characterization*, *Starch/Stärke* 41:205-207.

Pérez S. & Bertoft E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review. *Starch Stärke* 62 (8), 389- 420.

Prieto-Méndez J., Trejo Cárdenas C. L., Prieto García F., Méndez –Marzo M. A., Bello-Pérez L. A. & Román Gutiérrez A. D. (2010), Acetilación y

caracterización del almidón de cebada, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 6 (1), 32-43.

Pushpamalar V., Langford S. J., Ahmad M. & Lim Y.Y. (2006). Optimization of reaction conditions for preparing carboxymethyl cellulose from sago waste. *Carbohydrate Polymers*, 64, 312-18.

Ramírez A. & Pacheco D.E. (2009). Propiedades funcionales de harinas altas en fibra dietética obtenidas de piña, y guanábana. *Interciencia*, 34(4), 293-298.

Rasper V. (1980). Theoretical aspects of amylographology. In *The amylograph Handbook*. A.C.C St Paul Minn.1-6.

Rohwer R.G. & Klem B. (1984). Acid Modified Starch: Production and uses. en *Starch: Chemistry and Technology*. (2ª Ed.) Academic Press Inc. London. 529-541.

Sánchez-Rivera M. M., Flores-Ramírez I., Zamudio-Flores P.B. González-Soto R. A. & Rodríguez-Ambríz S. L. (2010), Acetylation of banana (*Musa paradisiaca* L.) and maize (*Zea mays* L.) starches using a microwave heating procedure and iodine as catalyst: Partial characterization. *Starch/Stärke*, 62, 155-164.

Seib P. A. & Stearns M. (1972). Extrusion processing of wheat starch. *Cereal Science Today*. 17(9), 102.

Singh J., Kaur, L., & McCarthy O. J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal, and rheological properties of some chemically modified starches for food application—A review. *Food Hydrocolloid*, 21, 1–22.

Singh N., Kaur S., Kaur A., Isono N., Ichihashi Y., Noda T. & Rana J.C. (2014) Structural, thermal, and rheological properties of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* starches. *Starch - Stärke* 66 (5), 457-467.

Sogi D.S., Oberoi D.P.S., Malik S. (2010) Effect of particle size, temperature, and total soluble solids on the rheological properties of watermelon juice: A response surface approach. *International Journal of Food Properties*, 13, 1207–1214.

- Stone L.A., Lorenz K. & Collins F. (1984) The starch of *Amaranthus*—Physico-chemical properties and functional characteristics. *Starch/Stärke*. 36, 232–237.
- Tang M. C. & Copeland L. (2007). Investigation of starch retrogradation using atomic force microscopy. *Carbohydrate Polymers*, 70, 1–7.
- Tester R. F. & Morrison W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry* 67 (6), 551-557.
- Uriyapongson, J. & Rayasduarte, P. (1994). Comparison of yield and properties of amaranth starches using wet and dry-wet milling processes. *Cereal Chemistry* 71: 571–577.
- Villarreal M. E., Ribotta P. D. & Iturriaga L. B. (2013). Comparing methods for extracting amaranthus starch and the properties of the isolated starches. *LWT - Food Science and Technology* 51, 441-447.
- Würzburg O. B. (1986). *Modified Starches: Properties and Uses*. 1^a ed. CRC Press, Boca Raton, Estados Unidos de América., 4-10, 29-40, 254-256.
- Witczak M., Ziobro R., Juszczak L. & Jaroslaw K., (2016), Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *Journal of cereal Science*. 67, 46–57.
- Xia X., Li G., Liao F., Zhang F., Zheng J. & Kan J., (2015), Granular Structure and Physicochemical Properties of Starches from Amaranth Grain, *International Journal of Food Properties*, 18,1029–1037.
- Xu Y., Miladinov V., & Hanna M. A. (2004). Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry*, 81, 735-740.
- Zhu F. (2017). Structure, Physicochemical Properties and Applications of Amaranth Starch. *Reviews. Food Science and Nutrition*, 57(2), 313-325.

ADICIÓN DE ALMIDÓN Y AISLADO DE PROTEÍNA DE LACTOSUERO EN LA FORMULACIÓN DE MASAS PARA ELABORACIÓN DE PAN LIBRE DE GLUTEN

RESUMEN

Se adicionó almidón de amaranto y WPI para la elaboración de un pan libre de gluten, se desarrollaron ocho formulaciones variando el contenido WPI y el tipo y porcentaje de almidón de amaranto (nativo y acetilado). Se evaluó la viscosidad de las masas resultantes y las características del pan elaborado, mediante el contenido de proteína, humedad perdida, y las propiedades texturales durante los primeros tres días de elaboración. Como resultados se encontró que los panes que contenían almidón acetilado retuvieron más agua, las formulaciones T_{N10:10} y T_{A10:5} presentaron una miga más homogénea, en cuanto a tamaño y dispersión de las celdas de gas, el resto de las formulaciones formaron canales de aire a través de la miga de pan. Se encontró que los panes elaborados con almidón acetilado perdieron menos humedad durante el horneado, se encontró que durante el primer día de almacenamiento, los panes adicionados con almidón acetilado mostraron menor firmeza, menor elasticidad y masticabilidad, pero mayor cohesividad, sin embargo, al segundo y tercer día la firmeza, elasticidad y masticabilidad aumentaron en el caso de la cohesividad disminuyó. Para el primer día de almacenamiento los panes con características similares al elaborado con harina de trigo fueron el tratamiento T_{N5:5} y T_{A10:5}.

Palabras clave: amaranto, acetilado, textura.

[§] Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

STARCH AND WHEY PROTEIN ISOLATED ADDITION IN DOUGH FORMULATIONS FOR GLUTEN-FREE BREAD BAKING

ABSTRACT

Amaranth starch and WPI were added for the preparation of a gluten-free bread, eight formulations were developed varying the WPI content and the type and percentage of amaranth starch (native and acetylated). The viscosity of the resulting doughs and the characteristics of the bread was evaluated, by through of the protein content, lost moisture, and the bread elaborated textural properties during the first three days of elaboration. It was found that the loaves containing acetylated starch retained more water, the $T_{N10:10}$ and $T_{A10:5}$ formulations presented a more homogeneous crumb, in terms of size and dispersion of the gas cells, the rest of the formulations formed water channels air through the bread crumb. It was found that breads made with acetylated starch lost less moisture during baking, it was found that during the first day of storage, the loaves added with acetylated starch showed less firmness, lower elasticity and chewiness, but greater cohesiveness, however, second and third day the firmness, elasticity and chewiness increased in the case of cohesiveness decreased. For the first day of storage, the loaves with characteristics similar to those made with wheat flour were the $T_{N5:5}$ and $T_{A10:5}$ treatments.

Palabras clave: amaranth, acetylated, texture.

CAPÍTULO 4: ADICIÓN DE ALMIDÓN Y WPI EN LA FORMULACIÓN DE MASAS PARA ELABORACIÓN DE PAN LIBRE DE GLUTEN

4.1 Introducción

Existe una demanda creciente por los productos libres de gluten, causada por el gran número de personas diagnosticadas como celíacos, además de la tendencia por parte de los consumidores a eliminar de su dieta las proteínas alergénicas, sin embargo, esto genera cambios en la estructura y textura estos alimentos tradicionalmente hechos a base de trigo (Gallagher, 2008; Witczak *et al.*, 2016).

La falta de gluten conduce a una masa líquida y puede dar como resultado un pan horneado con textura desmoronable, color deficiente y otros defectos de calidad posteriores a la cocción (Matos y Rosell, 2012). El desarrollo de formulaciones para productos libres de gluten comparables con los tradicionales basados en trigo en términos de propiedades sensoriales, valor nutricional y aceptación del consumidor es difícil debido a la cocción inadecuada y las características nutricionales de las materias primas utilizadas (Diowksz, Sucharzewska y Ambroziak, 2008; Gallagher, Gormley y Arendt, 2003).

En este contexto el almidón juega un papel importante, ya que su elección y tratamiento adecuados podrían afectar significativamente las propiedades de los productos libres de gluten. El almidón y el agua solos, no podrían formar una masa con propiedades mecánicas apropiadas, pero la presencia de polisacáridos o proteínas solubles permite la formación de una red viscoelástica que podría

moldearse, su papel se encuentra relacionado principalmente con la viscosidad, haciendo dominante su funcionalidad durante el proceso de calentamiento (Gallagher, 2008; Jekle y Becker, 2012; Murphy, 2009; Witczak, *et al.*, 2016). La reología de la masa está determinada por la elección de harina / almidón y composición de hidrocoloides, ambos factores tienen un impacto sobre el procesamiento mecánico (Demirkesen, Mert, Sumnu y Sahin, 2010).

4.2 Materiales y Métodos

Los almidones de amaranto utilizados fueron extraídos en la fase previa, Mantequilla (Chipilo, UNIFOODS S.A. de C.V., México), Proteína de lactosuero (Hilmar TM 9410, Vilher S.A. de C.V., Jalisco, México), Huevo “San Marcos”, Azúcar “Zulka”, Harina de Arroz “Tres estrellas”, Polvo para hornear “Royal”.

4.2.1 Formulación de masas

La formulación de masas se muestra en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Formulación de masas para cada tratamiento por kg de harina.

Tratamiento	Harina (kg)	Huevo (kg)	Agua L	WPI (kg)	Mantequilla (kg)	Azúcar (kg)	Royal (kg)	Almidón (kg)
T _{N10:10}	1	1	1	.52	.4	.66	.05	.52
T _{N10:5}	1	1	1	.484	.4	.66	.05	.244
T _{N5:10}	1	1	1	.246	.4	.66	.05	.49
T _{N5:5}	1	1	1	.23	.4	.66	.05	.230
T _{A10:10}	1	1	1	.52	.4	.66	.05	.52
T _{A10:5}	1	1	1	.484	.4	.66	.05	.244
T _{A5:10}	1	1	1	.246	.4	.66	.05	.49
T _{A5:5}	1	1	1	.23	.4	.66	.05	.23
T _{CONTROL}	1	1	1	-	.4	.66	.05	-

Para la elaboración de masas se dejó la mantequilla a temperatura ambiente hasta alcanzar una consistencia cremosa. El almidón, el WPI y el agua se mezclaron a 600 rpm durante 10 minutos. La mantequilla y la yema de huevo fueron batidas con ayuda de una batidora, se incorporó azúcar hasta mezclar homogéneamente, posteriormente se agregó harina de arroz, polvo para hornear

y la mezcla de almidón: WPI y se batió nuevamente la mezcla, posteriormente se agregó la clara de huevo batida a punto de turrón, de manera lenta y envolvente. La mezcla fue vertida en un molde previamente engrasado y horneada a 180 °C durante 17 minutos en una estufa (HCF-62, Riossa Digital, Puebla, México).

4.2.2 Propiedades reológicas de la masa

La viscosidad de las masas se determinó en un reómetro Anton Paar Physica MCR 300 (Gaz, Austria), equipado con geometría de platos paralelas, la muestra fue colocada en el sistema sistema Peltier Viscotherm VT2, Paar Physica (Gaz, Austria), y midió a una temperatura de 25 °C .

4.2.3 Determinación de humedad en panes

Para la determinación de humedad perdida en los panes, el peso de la masa vertida en un capacillo previamente pesado fue registrado y posteriormente el peso del pan una vez frío. Se aplicó la siguiente formula:

$$\text{humedad perdida} = \frac{(\text{peso masa} - \text{peso pan} - \text{capacillo}) * 100}{\text{peso masa}} \dots\dots\dots (8)$$

4.2.4 Determinación del contenido de proteína

Se realizó el contenido de proteína por el método de Kjeldhal (AOAC, 1998). La proteína fue obtenida pesando la cantidad de 0.5 a 1.0 g de pan, tomando tres repeticiones para cada tratamiento muestra. Después se colocó la muestra en los tubos para digestión adicionando dos pastillas catalizadoras, 14 mL de ácido sulfúrico y dos gotas de octanol. Después se colocó la muestra en los tubos para digestión. Los tubos se colocaron en el digestor (Tecator, FOSS) calentando suavemente al principio hasta alcanzar los 400 °C, se calentó hasta completar su digestión, punto donde la mezcla forma una solución verde esmeralda. Terminada la digestión se dejó enfriar, y se utilizó un destilador (Kjeltec 8100,

FOSS) para recuperar el destilado, añadiendo 30 mL de ácido bórico y tres gotas de indicador para proteína. El destilado fue titulado con ácido clorhídrico valorado.

El contenido de proteína se calculó usando el factor de conversión:

$$\text{mg Nitrogeno} = N * V * 14 \dots\dots\dots(10)$$

N = Normalidad del ácido de valoración.

V = Volumen de ácido consumido.

14 = Peso atómico del nitrógeno.

Para determinar el contenido de proteínas corregir por el factor adecuado según la naturaleza de la muestra.

$$\% \text{ de proteína} = \frac{\text{mg Nitrogeno}}{(\text{peso de la muestra})(\text{factor proteico})} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

El factor de conversión utilizado fue de 5.7 que corresponde al pan.

4.2.5 Determinación de textura en el pan

Las propiedades mecánicas son de importancia en el comportamiento de los alimentos, durante el procesamiento, almacenamiento, distribución y consumo. Por tal motivo, el TPA se realizó el día de elaboración del pan, después de su enfriamiento. La textura del pan fue determinada con un texturómetro (TEXTURE ANALYSER MODEL XT2i, England), a cada pan se le retiro la parte superior procurando que la superficie fuera lisa, dejando aproximadamente 2.5 cm de altura, se aplicó un perfil de textura (TPA), comprimiendo los panes un 20 %, a una velocidad de cabezal de 1 mm/s, con un tiempo de espera de 5 segundos

entre las compresiones. Los resultados analizados fueron: firmeza ($\text{g}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$), elasticidad (adimensional), cohesividad (adimensional) y masticabilidad (g).

4.3 Resultados

4.3.1 Humedad perdida en los panes

El tipo y cantidad de almidón así como, la cantidad de proteína influyeron en la pérdida de humedad en los panes elaborados, en la Figura 15 se puede observar la humedad pérdida en cada tratamiento después del proceso de horneado y el enfriamiento del pan.

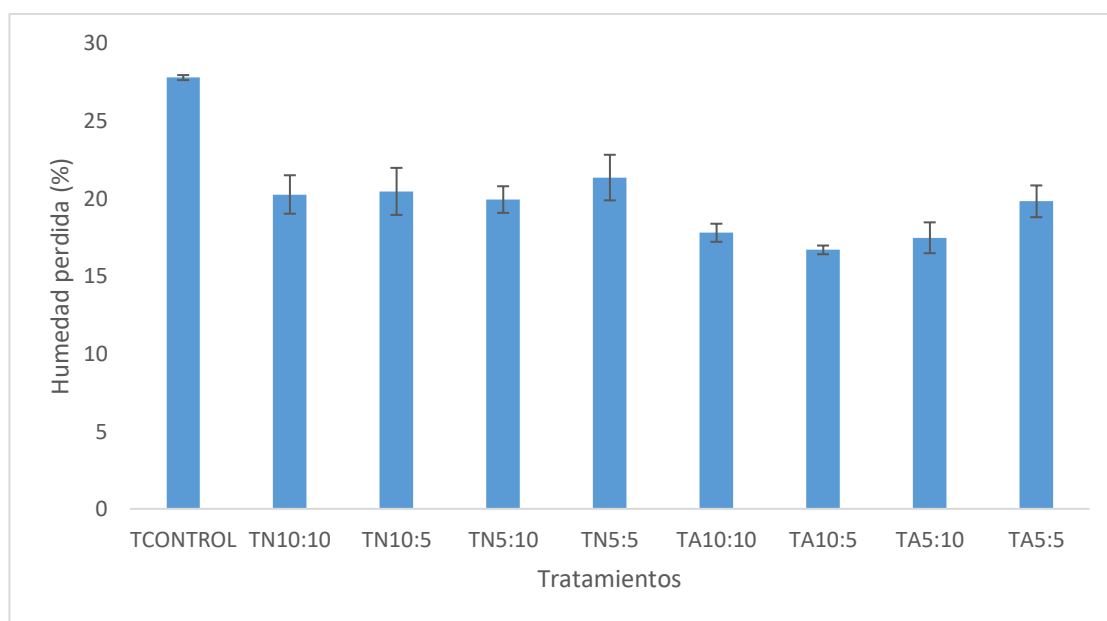


Figura 15. Porcentaje de humedad pérdida durante el primer día en los diferentes tratamientos ensayados.

Se puede observar que los tratamientos $T_{N10:10}$, $T_{N10:5}$, $T_{N5:10}$, $T_{N5:5}$, que corresponden a los panes elaborados con almidón nativo, fueron los que presentaron mayor pérdida de humedad comparados con los panes elaborados con almidón acetilado.

Esto se puede atribuir a la temperatura interna que alcanza la pieza de pan (60-80 °C) durante el proceso de horneado (Fenemma, 2000), en el caso del almidón acetilado temperatura a la cual alcanza mayor capacidad de retención de agua es a los 70 °C, lo que favorece que la pérdida de humedad sea menor.

La gelatinización del almidón es crucial para hornear el producto, depende fundamentalmente de la estructura cristalina del almidón, contenido de amilosa, el tamaño y forma del gránulo. Los otros componentes de la formulación de la masa pueden modificar el comportamiento del almidón, especialmente al cambiar la disponibilidad de agua, si se reduce, la gelatinización se retarda, si los otros constituyentes de la masa liberan más agua con el calentamiento podría ocurrir la gelatinización más rápidamente. Esto a su vez puede influir en la gelificación y la retrogradación del almidón al enfriarse (Houben *et al.*, 2012).

4.3.2 Contenido de proteína en el pan

En el Cuadro 12 se muestra el contenido de proteína en los panes resultantes de las formulaciones, los porcentajes obtenidos concuerdan con lo esperado, es decir los panes con 10 % de proteína adicionada tuvieron los valores más altos, a excepción de T_{N5:5}, sin embargo, esto puede atribuirse a el peso de la muestra tomada, ya que fue de los panes con mayor pérdida de humedad y al tomar la muestra hubo mayor concentración de proteína.

Cuadro 12. Contenido de proteína en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Proteína (%)
T _{A10:10}	16.56 ± 0.54 ^a
T _{N10:5}	15.13 ± 0.08 ^b
T _{N10:10}	14.74 ± 0.09 ^b
T _{N5:5}	13.31 ± 0.17 ^c
T _{A10:5}	12.88 ± 0.18 ^c
T _{A5:10}	11.55 ± 0.03 ^d
T _{A5:5}	11.35 ± 0.24 ^d
T _{CONTROL}	10.95 ± 0.14 ^{d, e}
T _{N5:10}	10.20 ± 0.02 ^e

Al realizar la comparación de medias se encontró que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos $T_{A5:10}$, $T_{A5:5}$, $T_{N5:10}$ y el tratamiento control.

El contenido de proteínas en las formulaciones resultó mayor con respecto al pan elaborado con harina de trigo, lo que resulta benéfico para este tipo de formulaciones libres de gluten ya que muchas veces presentan un bajo valor nutritivo.

4.3.3 Curva de flujo de las masas

El origen y el tipo de almidón influyen en la microestructura, la reología de la masa, la retención de agua y la estructura final y la calidad de los productos. Propiedades tales como tamaño de gránulo, hinchamiento, solubilidad en agua, propiedades reológicas de pasta y gel de almidón, capacidad de amilosa para formar un complejo con grasas y emulsionantes de alimentos juegan un papel importante en las propiedades finales de los productos de almidón (Yan y Barbosa-Canovas, 1997). Las curvas de flujo de las masas analizadas se ajustaron al modelo de Carreau que se muestra a continuación:

$$y = \frac{y_0 - y_{inf}}{(1 + (a \cdot x)^2)^p} + y_{inf}, \quad y_0 - y_{inf} > 0 \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

y^∞ = la viscosidad infinita a tasas de corte altas

y_0 = la viscosidad inicial o cero

a = es un tiempo de relajación

x = tasa de corte

p = es el exponente de potencia

Los parámetros de ajuste al modelo Carreau se muestran en el Cuadro 13

Cuadro 13. Parámetros de regresión del modelo Carreau.

Parámetros de Regresión					
Tratamiento	$y_0 - y_{inf}$	y_{inf}	a	p	R_{xy}
T _{CONTROL}	308.73 ^a	0.01746 ^a	226.65 ^a	0.3363 ^{ab}	0.99932
T _{N10:10}	1191.7 ^a	0.11512 ^a	447.1 ^a	0.388 ^{ab}	0.99931
T _{N10:5}	707.49 ^a	0.07172 ^a	490.96 ^a	0.3657 ^{ab}	0.99897
T _{N5:10}	1670.7 ^a	0.08251 ^a	2753.2 ^a	0.3644 ^{ab}	0.99455
T _{N5:5}	8057.3 ^a	0.05767 ^a	9201.4 ^a	0.4104 ^a	0.9926
T _{A10:10}	201.14 ^a	0.1536 ^a	283.26 ^a	0.2965 ^b	0.99621
T _{A10:5}	2.616 E+11 ^a	0.1307 ^a	3.406E+14 ^a	0.3627 ^a	0.99691
T _{A5:10}	287.19 ^a	0.1196 ^a	819.36 ^a	0.3019 ^b	0.99448
T _{A5:5}	341.95 ^a	0.05717 ^a	632.09 ^a	0.3306 ^{ab}	0.99826

Sin embargo no se muestran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos formulados y el tratamiento control.

En la Figura 16 se muestran las curvas de viscosidad contra la tasa de corte de los tratamientos adicionados con WPI: almidón de amaranto. El patrón de flujo de todos los tratamientos fue similar. A tasas de corte de $10^{-3} \cdot s^{-1}$ se observa un incremento en la viscosidad de todas las masas posiblemente a reacomodos en la estructura, seguido de una pérdida de viscosidad. Se observa que las disminuciones en la viscosidad de las masas corresponden a los incrementos en la tasa de corte.

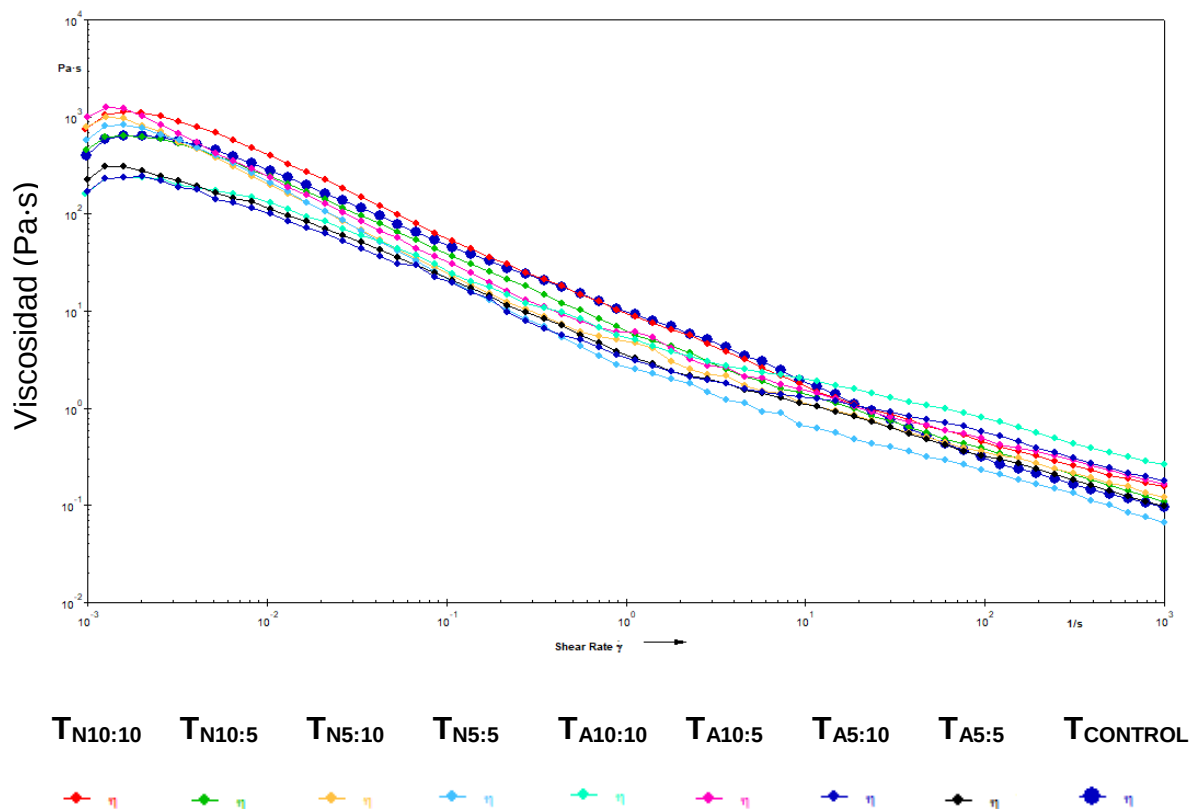


Figura 16. Comportamiento de la viscosidad en las masas, en función de la tasa de corte.

La adición de agua tiene un efecto obvio en los polvos de almidón, los gránulos se pueden conectar a través de sus moléculas, formando una estructura continua con propiedades viscoelásticas, y, a mayor nivel de adición, la sedimentación de los gránulos es lenta. El comportamiento exacto de dicho sistema depende en gran medida del origen del almidón, pero también en sustancias no amiláceas, que podrían estar involucradas en su estabilización, como hidrocoloides, surfactantes y otras moléculas solubles en agua (Witczak *et al.*, 2016).

Al no encontrarse diferencias estadísticamente significativas en el comportamiento de las masas con respecto a la masa control, se puede concluir que la incorporación de la proteína y el almidón no representan cambios durante el proceso de elaboración del pan.

4.3.4 Análisis de textura de los panes

En la Figura 17 se observa que de los tratamientos $T_{N10:10}$ y $T_{A10:5}$, presentaron la miga más homogénea y pequeña, esto puede explicarse porque al tener mayor contenido de proteína existe mayor competencia por el agua entre el almidón, lo que ocasiona que el almidón se agite con cantidades limitadas de agua, la hinchazón de los gránulos de almidón provoca la formación de una estructura más compacta, que podría observarse por una mayor resistencia de mezcla a la generación de burbujas de aire durante el tratamiento térmico (Witczak *et al.*, 2016) y genera un tamaño de miga pequeño.

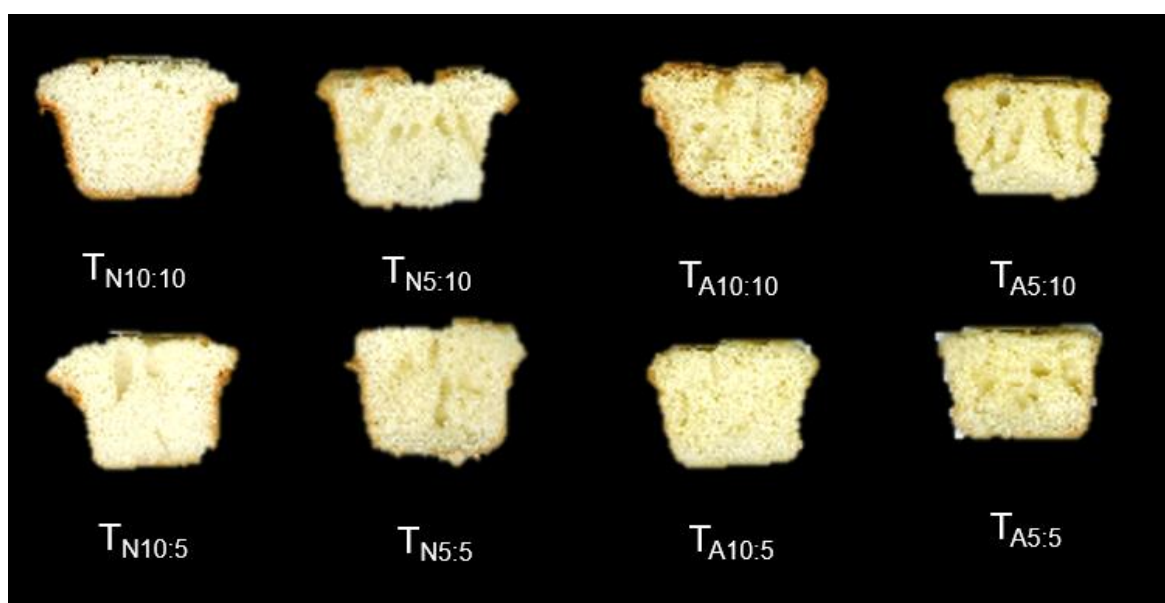


Figura 17. Panes elaborados con las diferentes formulaciones.

Otros componentes de la formulación de masa pueden modificar comportamiento del almidón, especialmente al cambiar la disponibilidad de agua. Si esto es reducida, la gelatinización es retardada, si hay más agua libre de otros constituyentes de la masa al calentar el proceso pueden ser logrado más rápido. Esto a su vez puede influir en la gelificación y la retrogradación del almidón al enfriarse. La apariencia física depende principalmente de su estructura interna la distribución de celdas de gas, fuerza y continuidad de sus paredes.

Una característica que presentaron los panes con menor cantidad de proteína ($T_{A5:10}$, $T_{A5:5}$, $T_{N5:10}$ y $T_{N5:5}$) fue la presencia de canales de aire, esto puede atribuirse a que la gelatinización fue retardada por la disponibilidad de agua, o la cantidad de almidón utilizado, los tratamientos $T_{A10:10}$ y $T_{N10:5}$ también tuvieron la presencia de canales de aire en la miga, un factor importante es la mezcla de la masa, cuando el gas se incorpora a la masa, y es un proceso influenciado en particular por las propiedades viscoelásticas de las masas, el almidón juega un papel importante en el suministro de matriz extensible, que podría retener dióxido de carbono, permite la expansión de la célula en crecimiento, previene su coalescencia con las células vecinas durante el crecimiento y estabilizar estructura final en el enfriamiento (Houben, Höchstötter y Becker, 2012).

Uno de los principales atributos de calidad del pan es su estructura de la miga que, además de darle al pan su aspecto característico, otorga atributos de textura. El volumen de pan puede alcanzar más del 70% del volumen de la barra, el tamaño y la densidad de las burbujas varían en diferentes panes, lo que resulta en enormes diferencias en la textura y propiedades sensoriales del producto final (Zghal, Scanlon y Sapirstein, 2002).

Otro de los factores que se modificó fue el tiempo de horneado, ya que para el pan elaborado con harina de trigo este tiempo fue de 25 minutos, en el caso de los almidones de amaranto se redujo a 17 minutos, esto debido a que los almidones requieren menor tiempo para la gelatinización, y por consecuencia la cocción de la masa de pan.

Firmeza

En la Figura 18 se muestra la firmeza de los diferentes tratamientos y su comportamiento durante los primeros tres días de almacenamiento, tomando como día 1 el día de su elaboración después del enfriado.

Se puede observar en general los panes elaborados con almidón nativo ($T_{N10:10}$, $T_{N10:5}$, $T_{N5:10}$, $T_{N5:5}$) fueron los que presentaron mayor firmeza, y el $T_{A10:5}$ de los acetilados. Los tratamientos $T_{N10:5}$, fue de los panes adicionados con almidón nativo el que presentó mayor firmeza, y el tratamiento $T_{A10:5}$, de los panes adicionados con almidón acetilado, estos tratamientos tienen en común el contenido alto de proteína (10 %) y contenido bajo de almidón (5 %), lo que sugiere que el contenido de proteína afecta la dureza de estos panes. Zhou, Liu y Tang (2017) encontraron que la incorporación de proteína de suero de leche aumento la dureza en panes de trigo enriquecidos con esta proteína.

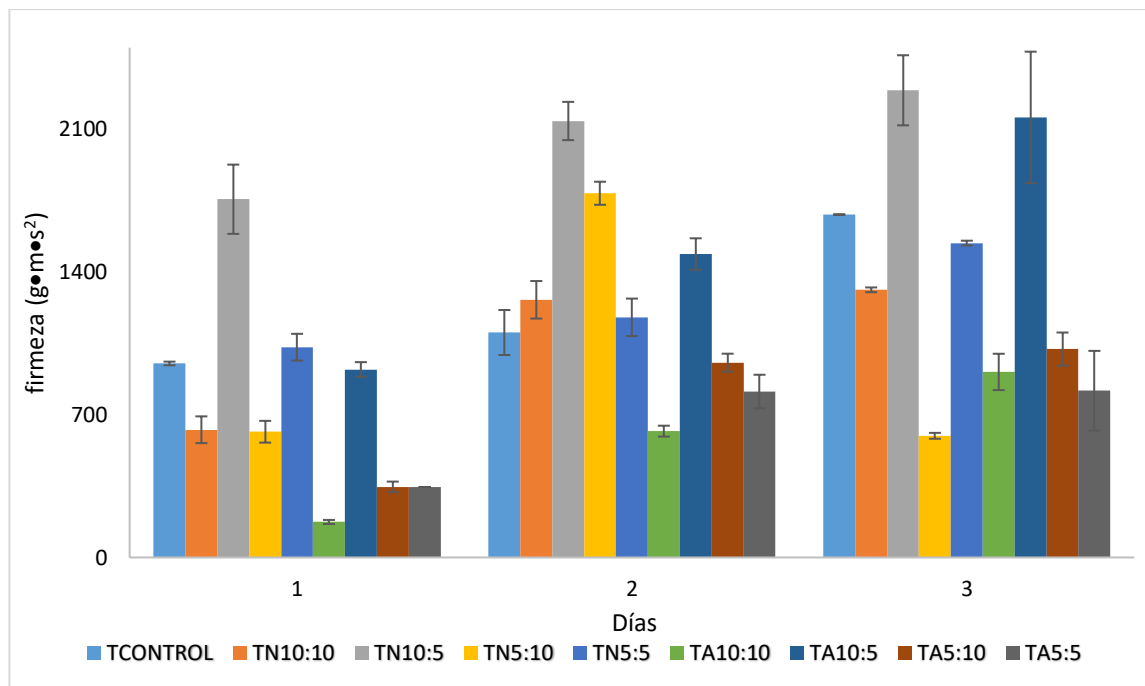


Figura 18. Firmeza de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.

He y Hosney (1990) revelaron que el incremento de la firmeza del pan durante el almacenamiento se relaciona con la pérdida de humedad, que propicia la interacción entre las proteínas y el almidón parcialmente solubilizado.

En la tabla 14 se muestra la comparación de medias de la firmeza en los panes mediante una prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$, durante los tres primeros días

de almacenamiento del pan. Se encontró que los tratamientos en donde el porcentaje almidón-proteína fue igual (5 % o 10 %) la firmeza fue menor comparados con los tratamientos elaborados con el mismo tipo de almidón, es decir, para los almidones nativos los tratamientos con menor firmeza fueron los tratamientos $T_{N10:10}$ y $T_{N5:5}$, en el caso de los acetilados los tratamientos $T_{A10:10}$ y $T_{A5:5}$ fueron los que presentaron menor firmeza, a pesar de esto, de manera general los panes elaborados con almidón acetilado tuvieron menor firmeza comparados con los elaborados con almidón nativo.

Cuadro 14. Firmeza de los panes durante 3 días de almacenamiento.

Tratamientos	Día 1	Día 2	Día 3
$T_{N10:5}$	1756.65 ^a	2140.30 ^a	2290.75 ^a
$T_{N5:5}$	1031.15 ^b	1177.50 ^{cd}	1541.65 ^{abc}
$T_{CONTROL}$	961.35 ^b	873.65 ^{de}	1681.4 ^{ab}
$T_{A10:5}$	921.85 ^b	1487.90 ^{bc}	2158.10 ^a
$T_{N10:10}$	921.85 ^{bc}	1263.55 ^{cd}	1312.40 ^{bcd}
$T_{N5:10}$	616.55 ^{bc}	1786.00 ^{ab}	596.55 ^d
$T_{A5:10}$	346.30 ^c	955.10 ^{cd}	1021.60 ^{bcd}
$T_{A5:5}$	345.25 ^c	813.80 ^{de}	817.35 ^{cd}
$T_{A10:10}$	174.00 ^c	619.45 ^e	909.80 ^{bcd}

Comparación de medias de tratamientos, mediante una prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.

La incorporación de almidón acetilado (por la retención de agua) tuvo efecto en la firmeza de los panes, encontrando que los tratamientos adicionados con este almidón tuvieron menores valores de firmeza que los nativos, sin embargo, los días de almacenamiento afectaron esta característica, aumentándola a través de los días de almacenamiento, comportamiento que se relaciona con la pérdida de humedad, que propicia la interacción entre las proteínas y el almidón.

Cohesividad

En la Figura 19 se muestra la cohesividad de los diferentes tratamientos y su comportamiento durante los primeros tres días de almacenamiento. Se puede

observar que los valores de cohesividad fueron mayores para el T_{CONTROL}, esto puede atribuirse al tipo de proteínas presentes en el trigo (gliadinas y gluteninas) que le proporcionan características viscoelásticas a la masa por la formación del gluten.

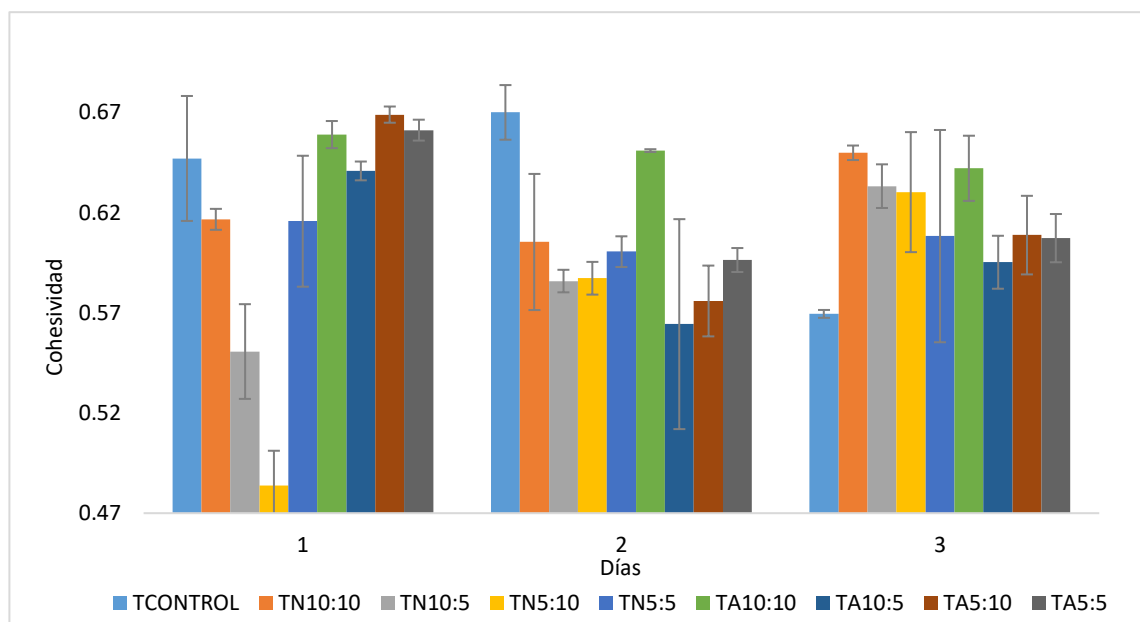


Figura 19. Cohesividad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.

Se encontró que los almidones acetilados (T_{A10:10}, T_{A10:5}, T_{A5:10} y T_{A5:5}) mostraron mayor cohesividad con respecto a los nativos, esto puede atribuirse a la capacidad que el almidón acetilado mejora el nivel de interacción entre los componentes de la masa, relacionados con la modificación del comportamiento del almidón durante el calentamiento y con las interacciones entre el almidón y otros compuestos presentes en el sistema, que dependen de las características del almidón (Witczak *et al.*, 2016).

Los tratamientos elaborados con almidón nativo tienen la tendencia a mantenerse o aumentar ligeramente durante los días de almacenamiento excepto el

tratamiento T_{N5:10} donde hay un incremento de la cohesividad mayor a través de los días, sin embargo no se muestran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos durante el tercer día de almacenamiento (Cuadro 15).

En el Cuadro 15 se muestra la comparación de medias de cohesividad entre los tratamientos por cada día de almacenamiento.

Cuadro 15. Cohesividad de los panes durante 3 días de almacenamiento.

Tratamientos	Día 1	Día 2	Día 3
T _{A5:10}	0.668755 ^a	0.575820 ^b	0.607158 ^a
T _{A5:5}	0.661014 ^a	0.596250 ^{ab}	0.608668 ^a
T _{A10:10}	0.658802 ^a	0.650827 ^{ab}	0.641991 ^a
T _{CONTROL}	0.646897 ^a	0.669868 ^a	0.569385 ^a
T _{A10:5}	0.640677 ^a	0.564281 ^b	0.595137 ^a
T _{N10:10}	0.616530 ^{ab}	0.605242 ^{ab}	0.649725 ^a
T _{N5:5}	0.615599 ^{ab}	0.600421 ^{ab}	0.608171 ^a
T _{N10:5}	0.550613 ^{bc}	0.585759 ^{ab}	0.633086 ^a
T _{N5:10}	0.483817 ^c	0.587161 ^{ab}	0.630107 ^a

Comparación de medias de tratamientos, mediante una prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.

Durante el primer día de almacenamiento los tratamientos no mostraron diferencias estadísticamente significativas con el tratamiento control a excepción de los tratamientos T_{N10:5} y T_{N5:10}. Para el segundo día de almacenamiento solo hubo diferencia con el tratamiento T_{A5:10}, y para el tercer día no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.

Sin embargo, mediante la comparación de medias se observa que la cohesividad no afecta de manera significativa la textura de los panes al no encontrar diferencias notorias entre los tratamientos.

Elasticidad

En la Figura 20 se observa la elasticidad de los tratamientos a través de los días de almacenamiento.

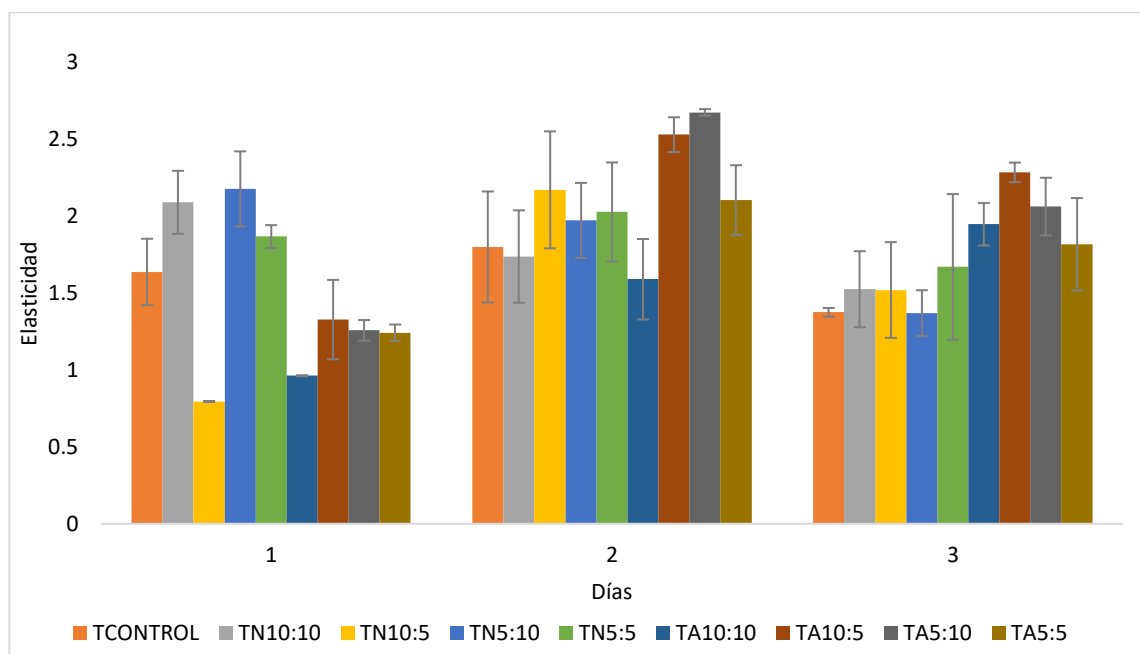


Figura 20. Elasticidad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.

Durante el primer día los tratamientos con almidón acetilado mostraron menor elasticidad con respecto a los nativos a excepción del tratamiento $T_{N10:5}$, sin embargo, para el segundo y tercer día los tratamientos con almidón acetilado mostraron mayor elasticidad que los elaborados con almidón nativo, en cuyo caso la elasticidad disminuyó para los tratamientos $T_{N5:5}$ y $T_{N10:10}$, los tratamientos $T_{N10:5}$ y $T_{N5:10}$ aumentaron su elasticidad al segundo día, que puede ser porque en este día se presenta mayor interacción entre los componentes de la masa, sin embargo, volvieron a disminuir en el tercer día de almacenamiento, a pesar de esto no se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos durante el segundo y tercer día.

Witczak *et al.* (2012) y Ziobro *et al.* (2012) encontraron que la adición de almidón químicamente modificado en cantidades de hasta 15% modifica significativamente la reología de la masa, mejora el volumen del pan y disminuye la miga dureza, mejorando su elasticidad.

En el Cuadro 16 se muestra la comparación de medias entre los tratamientos con respecto a la elasticidad y a través de los días de almacenamiento.

Cuadro 16. Elasticidad de los panes durante 3 días de almacenamiento.

Tratamiento	Día 1	Día 2	Día 3
T _{N5:10}	2.1775 ^a	1.9725 ^{ab}	1.3700 ^a
T _{N10:10}	2.0900 ^a	1.7375 ^{ab}	1.5250 ^a
T _{N5:5}	1.8675 ^{ab}	2.0275 ^{ab}	1.6700 ^a
T _{CONTROL}	1.6375 ^{ab}	1.8000 ^{ab}	1.3750 ^a
T _{A10:5}	1.3275 ^{bc}	2.5300 ^{ab}	2.2850 ^a
T _{A5:10}	1.2575 ^{bc}	2.6750 ^a	2.0625 ^a
T _{A5:5}	1.2425 ^{bc}	2.1050 ^{ab}	1.8175 ^a
T _{A10:10}	0.9625 ^c	1.5900 ^b	1.9475 ^a
T _{N10:5}	0.7950 ^c	2.1710 ^{ab}	1.5200 ^a

Comparación de medias de tratamientos, mediante una prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.

Mediante la comparación de medias se encontró que durante el primer día los tratamientos T_{N5:10}, T_{N10:10}, T_{N5:5}, T_{A10:5}, T_{A5:10} y T_{A5:5} fueron los más parecidos al T_{CONTROL}. Durante el segundo y el tercer día de almacenamiento no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ningún tratamiento. Por lo tanto la elasticidad tampoco es un factor decisivo para la textura de los panes desarrollados.

Masticabilidad

Los panes adicionados con almidón acetilado fueron los que presentaron menor masticabilidad comparado con los elaborados con almidón nativo. En la Figura 21 se observa el comportamiento de la masticabilidad en los panes durante los

primeros tres días. Los panes adicionados con almidón nativo presentaron mayor masticabilidad.

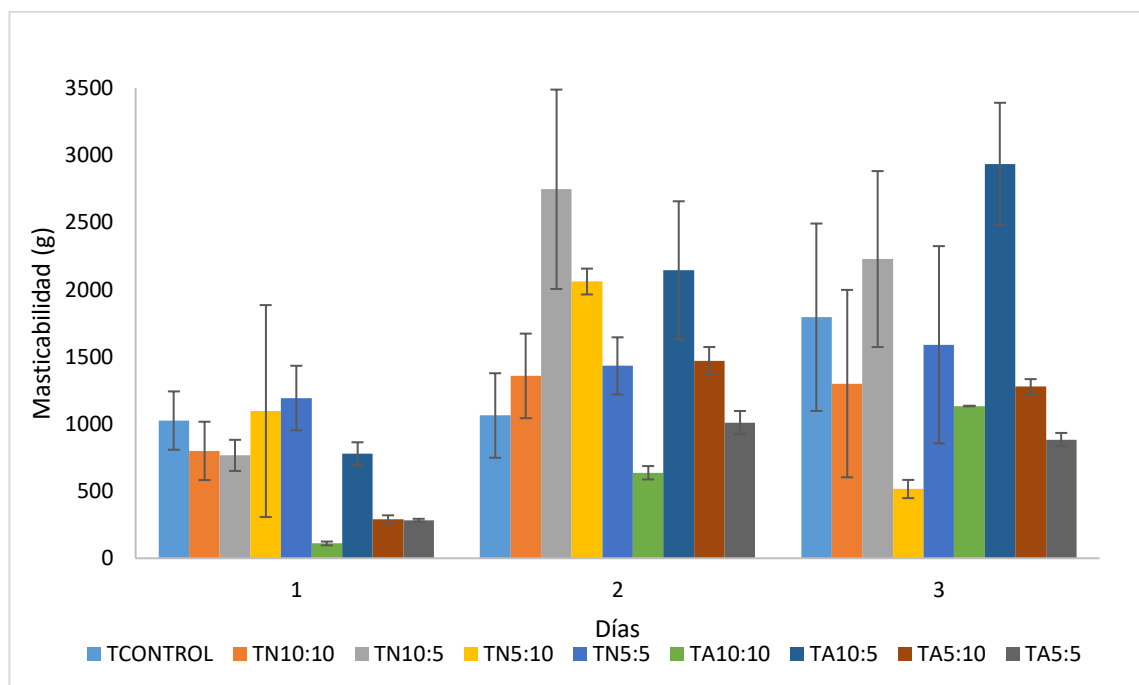


Figura 21. Masticabilidad de los diferentes tratamientos durante los primeros tres días de almacenamiento.

Se observa un incremento de la masticabilidad conforme aumentan los días de almacenamiento, el tratamiento $T_{A10:10}$ fue el pan que presentó menor masticabilidad durante los tres días de almacenamiento, el tratamiento $T_{N10:5}$, fue el que presentó mayor masticabilidad, al igual que el $T_{A5:10}$ que para el día 2 y 3 aumenta drásticamente.

Los tratamientos $T_{N10:10}$, $T_{A10:5}$ y $T_{N10:5}$ no mostraron diferencias estadísticamente significativas con el control, se observan diferencias estadísticamente significativas en los tratamientos entre el primer y segundo día, pero no son tan notorios durante el segundo y tercer día de almacenamiento.

En el Cuadro 17 se muestra la comparación de medias entre los tratamientos con respecto a la masticabilidad y a través de los días de almacenamiento

Mediante la comparación de medias se encontró que durante el primer día los tratamientos $T_{N5:10}$, $T_{N10:10}$, $T_{N5:5}$, $T_{A10:5}$ y $T_{N10:5}$ fueron los más parecidos al $T_{CONTROL}$. Para el segundo día no se encontraron diferencias estadísticamente significativas y para el tercer día solo el tratamiento $T_{A10:5}$ fue diferente a los demás.

Cuadro 17. Masticabilidad de los panes durante 3 días de almacenamiento.

Tratamiento	Día 1	Día 2	Día 3
$T_{N5:5}$	1192.72 ^a	1432.02 ^{abc}	1588.87 ^{abc}
$T_{CONTROL}$	1024.63 ^{ab}	1062.54 ^{bc}	1793.75 ^{bc}
$T_{N10:10}$	799.11 ^{abc}	1357.35 ^{abc}	1299.98 ^{bc}
$T_{A10:5}$	777.74 ^{abc}	2143.75 ^{ab}	2935.11 ^a
$T_{N10:5}$	765.76 ^{abc}	2746.12 ^{ab}	2226.60 ^{ab}
$T_{N5:10}$	1095.8 ^{bc}	2059.53 ^{abc}	515.33 ^c
$T_{A5:10}$	290.15 ^{cd}	1469.43 ^{abc}	1278.08 ^{bc}
$T_{A5:5}$	283.52 ^{cd}	1009.84 ^{bc}	883.44 ^{bc}
$T_{A10:10}$	110.42 ^d	636.46 ^c	1133.17 ^{bc}

Comparación de medias de tratamientos, mediante una prueba de Tukey con un $\alpha = 0.05$.

Los panes adicionados con almidón acetilado fueron los que presentaron menor masticabilidad comparado con los elaborados con almidón nativo, sin embargo, esta característica fue aumentando a través de los días de almacenamiento. Este parámetro está relacionado con la firmeza, y se observa el mismo comportamiento en las gráficas durante el tiempo de medición.

4.4 Conclusiones

La adición de almidones de amaranto acetilado (5 %) y WPI (10 %), permitió la elaboración de pan libre de gluten, con características de textura similares a un pan elaborado con harina de trigo.

La incorporación de almidón de amaranto acetilado y WPI disminuyó la pérdida de humedad en los panes desarrollados. El porcentaje de proteína en los panes

elaborados fue de 10.2 - 15.56 % lo que aumento el valor nutritivo y permitió obtener un pan con valor nutritivo mayor a una formulación con harina de trigo.

Mediante la adición de almidón acetilado se requiere menos energía para el proceso de gelatinización, se obtienen más rendimientos en el pan, y se obtienen panes con mayor contenido de proteína y menor contenido de carbohidratos.

4.5 Literatura Citada

- A.O.A.C. (1984). Official Methods of Analysis of Official Analytical Chemists. E.U.A. (14^a Ed.) Washington, D.C.
- Copeland L., Blazek J., Salman H. & Chiming T. M. (2009). Form and functionality of starch. Food Hydrocolloids 23, 1527-1534.
- Demirkesen I., Mert B., Sumnu G. & Sahin S. (2010). Rheological properties of glutenfree bread formulations. Journal Food Engineering. 96, 295-303.
- Diowksz A., Sucharzewska D. & Ambroziak W. (2008). Impact of starch mixture composition on properties of gluten-free bread. Food Science Technology Quality 2 (57), 4-50.
- Fenemma R. O. (2000). Química de los alimentos, Edit. Acribia, (2^a Ed.) 96-100
- Houben A., Höchstätter A. & Becker T. (2012). Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. European Food Research and Technology. 235 (2), 195-208.
- Gallagher E., Gormley T. R. & Arendt E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. Journal Food Engineering. 56, 153-161.
- Gallagher E. (2008). Formulation and nutritional aspects of gluten-free cereal products and infant foods. In Gluten-free Cereal Products and Beverages. Academic Press, Amsterdam, Boston. 321-346.
- He H. & Hosney R.C. (1990) Changes in bread firmness and moisture during long-term storage. Cereal Chemistry Journal. 67, 603-605.
- Jekle M., & Becker T. (2012). Effects of acidification, sodium chloride, and moisture levels on wheat dough: II. Modeling of bread texture and staling kinetics. Food Biophysics, 7(3), 200-208.
- Korus J., Witczak M., Ziobro R. & Juszczak L. (2009). The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread. Food Hydrocolloids. 23 (3), 988-995.

- Matos M.E. & Rosell C.M. (2012). Relationship between instrumental parameters and sensory characteristics in gluten-free breads. *European Food Research and Technology* 235 (1), 107-117.
- Mills E. N. C., Salt L. J. & Wilde P. J. (2007). Bubble formation and stabilisation in bread dough in *Understanding and Controlling the Microstructure of Complex Foods*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 691-701.
- Murphy P. (2009). Starch. In: *Handbook of Hydrocolloids*. Woodhead Publishing Ltd., Abington, Cambridge, 108-141.
- Witczak M., Juszczak L., Ziobro R. & Korus J. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part I: rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Food Hydrocolloids* 28 (2), 353-360.
- Witczak M., Ziobro R., Juszczak L., Jaroslaw K. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems – A review. *Journal of cereal Science*. 67, 46–57.
- Yan H. & Barbosa-Canovas G.V. (1997). Compression characteristics of agglomerated food powders: effect of agglomerate size and water activity. *Food Science and Technology International*. 3 (5), 351-359.
- Zghal M.C. Scanlon M. G. & Sapirstein H. D., (2002). Cellular structure of bread crumb and its influence on mechanical properties. *Journal of cereal science*. 36, 167-176.
- Zhou J., Liu J. & Tang X. (2017). Effects of whey and soy protein addition on bread rheological property of wheat flour. *Journal of Texture Studies*. 1-9 <https://doi.org/10.1111/jtxs.12275>
- Ziobro R., Korus J., Witczak M. & Juszczak L., (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part II: quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids* 29 (1), 68-74.