

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“OBTENCIÓN DE ALMIDONES DE PAPA
(*Solanum tuberosum*) PREGELATINIZADOS USANDO
CALENTAMIENTO ÓHMICO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO EN ALIMENTOS

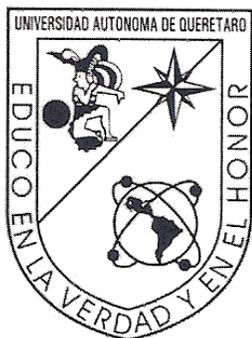
PRESENTA

BETTINA SIGALA ADAME

DIRIGIDA POR

DRA. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“OBTENCIÓN DE ALMIDONES DE PAPA
(*Solanum tuberosum*) PREGELATINIZADOS USANDO
CALENTAMIENTO ÓHMICO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

BETTINA SIGALA ADAME

DIRIGIDA POR

DRA. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

SINODALES

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ
DIRECTOR

Dra. AUREA KARINA RAMÍREZ JIMÉNEZ
SINODAL

Dr. EDUARDO MORALES SANCHEZ
SINODAL

Dra. ROCIO CAMPOS VEGA
SINODAL

ÍNDICE GENERAL

| Contenido | Página |
|---|--------|
| ÍNDICE GENERAL | i |
| ÍNDICE DE CUADROS | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | v |
| RESUMEN | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1 Amilosa..... | 2 |
| 1.2 Amilopectina | 3 |
| 1.3 Propiedades fisicoquímicas del almidón..... | 4 |
| 1.3.1 Cristalinidad..... | 4 |
| 1.3.2 Birrefringencia | 5 |
| 1.3.3 Solubilidad en agua fría..... | 5 |
| 1.3.4 Absorción de agua | 5 |
| 1.3.5 Poder de hinchamiento | 6 |
| 1.3.6 Gelatinización | 7 |
| 1.3.7 Viscosidad de almidones | 7 |
| 1.3.8 Temperatura de pastificación | 10 |
| 1.3.9 Retrogradación..... | 10 |
| 1.4 Modificación de almidones | 10 |
| 1.5 Uso de los almidones modificados | 13 |
| 1.5.1 Almidones físicamente modificados..... | 13 |
| 1.5.1.1 Pre-gelatinizados | 13 |
| 1.5.1.2 Gelatinizados | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.1.3 Tratamiento de calor-humedad..... | 15 |
| 1.5.1.4 Annealing (recocido)..... | 16 |
| 1.5.1.5 Extrusión..... | 17 |
| 1.5.2 Almidones químicamente modificados | 17 |
| 1.6 Calentamiento óhmico | 19 |
| 2. OBJETIVOS | 23 |
| 2.1 Objetivo General..... | 23 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 23 |
| 3. METODOLOGÍA | 24 |
| 3.1 Almidón de papa | 24 |
| 3.2 Contenido de amilosa..... | 24 |
| 3.3 Calentamiento óhmico..... | 24 |
| 3.4 Propiedades de pasta | 25 |
| 3.5 Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA)..... | 25 |
| 3.6 Capacidad de absorción de aceite | 26 |
| 3.7 Calorimetría diferencial de barrido | 27 |
| 3.8 Microscopia electrónica de barrido (SEM)..... | 27 |
| 3.9 Diseño estadístico | 27 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 28 |
| 4.1 Análisis de amilosa en almidón de papa nativo | 28 |
| 4.2 Calentamiento óhmico | 28 |
| 4.3 Perfil de viscosidad de almidón de papa por calentamiento óhmico..... | 31 |
| 4.4 Calorimetría diferencial de barrido | 36 |
| 4.5 Índice de absorción y solubilidad de agua e índice de absorción de aceite.... | 41 |
| 4.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM) | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 4.7 Correlación de Pearson y componentes principales de las variables..... | 46 |
| analizadas. | |
| 5. CONCLUSIONES | 50 |
| 6. REFERENCIAS..... | 51 |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Propiedades generales de los almidones nativos | 1 |
| 2 | Cristalinidad del almidón, de acuerdo a la especie vegetal | 4 |
| 3 | Características generales del almidón de maíz y de papa | 9 |
| 4 | Métodos para modificar almidones | 12 |
| 5 | Contenido de amilosa en almidón de papa nativo | 28 |
| 6 | Valores de viscosidad máxima (cP), viscosidad mínima (cP), y viscosidad final (cP) para almidones de papa tratados por calentamiento óhmico | 33 |
| 7 | Efecto de los parámetros de procesos en las propiedades térmicas de almidón de papa pregelatinizado usando calentamiento óhmico | 40 |
| 8 | Valores de índice de absorción de agua, índice de solubilidad e índice de absorción de aceite para almidones de papa tratados por calentamiento óhmico | 43 |
| 9 | Coeficientes de correlación entre los parámetros físicos | 47 |
| 10 | Análisis de componentes principales (ACP) | 48 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Estructura química de la amilosa | 3 |
| 2 | Estructura química de la amilopectina | 3 |
| 3 | Perfil de viscosidad del almidón nativo | 8 |
| 4 | Diagrama esquemático del equipo de calentamiento utilizado. | 24 |
| 5 | Conductigramas de almidón de papa por calentamiento óhmico por lote a diferentes porcentajes de humedad a) 50 % de humedad, b) 40% de humedad, c) 30 % de humedad. | 29 |
| 6 | Efecto de las variables de proceso en la potencia requerida para obtener almidones pregelatinizados usando calentamiento óhmico | 31 |
| 7 | Viscoamilogramas de almidón de papa por calentamiento óhmico por lote a diferentes voltajes | 32 |
| 8 | Muestra a 50% de humedad y 120 V con dos endotermas. | 38 |
| 9 | Micrografías de almidón de papa tratados por calentamiento óhmico | 44 |
| 10 | Análisis de componentes principales en diferentes cuadrantes | 49 |

RESUMEN

El almidón es el polisacárido de reserva de las plantas superiores. El carbohidrato está compuesto por dos homopolímeros de la glucosa: amilosa y amilopectina. Los almidones nativos poseen propiedades funcionales particulares que confieren atributos como la viscosidad, claridad de geles, solubilidad, capacidad de retención de agua e hinchamiento; estas propiedades son importantes en la industria alimentaria. Sin embargo, el almidón en estado nativo presenta ciertas limitaciones, tales como: es insoluble en agua fría, aumenta la viscosidad de los productos en los que se incorpora, genera sinéresis, entre otros. Por lo tanto, se ha recurrido a métodos de modificación que provocan cambios en su estructura, en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. Estas modificaciones pueden ser de tipo químicas, físicas o enzimáticas. En este trabajo se aborda la modificación física del almidón de papa, a través del calentamiento óhmico (CO), método basado en el calor generado dentro del material debido al paso de corriente eléctrica. El uso del CO permite minimizar las pérdidas de sólidos y controlar el grado de pregelatinización y gelatinización de almidones, además de disminuir tiempos de proceso. Para obtener los almidones pregelatinizado de papa, se prepararon muestras a diferente relación de almidón nativo: agua destilada (30, 40 y 50% p/v), posteriormente se aplicaron tres potenciales (110, 120 y 130 V) hasta alcanzar 100°C de temperatura. Los almidones pregelatinizado se caracterizaron usando: calorimetría de barrido diferencial, microscopía electrónica de barrido, análisis de viscosidad, entre otras. Los resultados mostraron que la humedad fue el factor determinante del grado de pregelatinización del almidón, obteniendo almidones pregelatinizado a bajas humedades (30 y 40% de humedad) aplicando 110 V. Estos almidones presentaron mayor viscosidad y valores altos de índice de absorción y solubilidad en agua. Se concluye que el calentamiento óhmico es una tecnología alternativa para la obtención de almidones pregelatinizado con propiedades deseadas y disminuyendo costos.

1. ANTECEDENTES

El almidón es el polisacárido alimentario digerible más importante y abundante. Se forma como polisacárido de reserva en hojas, tallo (médula), raíces (tubérculos), semillas, fruta y polen de muchas plantas superiores. Se encuentra en forma de gránulos simples, parcialmente cristalinos cuyo tamaño, forma y temperatura de gelatinización dependen de la procedencia botánica del almidón. La variación del tamaño de los gránulos de almidón va desde 0.5 a 100 μm . Los más grandes están presentes en la papa (15 a 100 μm) (Lineback,1984). Los gránulos de almidón son relativamente densos e insolubles; se hidratan muy mal en agua fría. Pueden dispersarse en agua, dando lugar a la formación de suspensiones de baja viscosidad que pueden mezclarse y bombearse fácilmente (Prieto y col., 2009).

Los almidones nativos se pueden distinguir de acuerdo a su tamaño, especie vegetal y porcentaje de regiones amorfas y/o cristalinas como se muestra en el Cuadro 1. Su aplicación tecnológica está relacionada directamente con esas características (Ratnayake y Jackson,2006; Bushuk,2001).

Cuadro 1. Propiedades generales de los almidones nativos

| Especie vegetal | Amilopectina (%) | Amilosa (%) | Tgel* (°C) | Tamaño del gránulo (μm) |
|------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|--|
| Maíz | 73 | 27 | 62-72 | 2-30 |
| Maíz rico en amilosa | 20-45 | 55-80 | 67-80 | 5-25 |
| Maíz céreo | 99-100 | 0-1 | 63-72 | 5-25 |
| Papa | 78 | 22 | 58-67 | 5-100 |
| Arroz | 83 | 17 | 62-78 | 2-5 |
| Tapioca | 82 | 18 | 51-65 | 5-35 |
| Sorgo céreo | 99-100 | 0-1 | 67-74 | 5-25 |
| Trigo | 76 | 24 | 58-64 | 1-45 |

*Tgel es la temperatura de gelatinización (Vermeulen y col., 2006b; Jobling, 2004; Singh y col., 2003; Whistler y BeMiller, 1999).

Al ser un polímero natural, presenta ventajas sobre algunos otros materiales empleados en la industria, ya que proviene de reservas naturales; es renovable, biodegradable, abundante y su procesamiento es de bajo costo (Xie y col., 2006; Averous, 2004; Rindlav-Westling y col., 2002; Averous y col., 2000). Por estas razones el almidón se ha utilizado como materia prima, como aditivo o en algunos casos como sustituto de materiales derivados del petróleo (Bratskaya y col., 2006; Jobling, 2004; Bushuk, 2001; Zhang, 2001).

Bioquímicamente el almidón consiste principalmente de dos homopolímeros de α -glucosa estructuralmente diferentes: la amilosa y la amilopectina (Buleon y col., 1998; Vermeulen y col., 2006).

1.1 Amilosa

La amilosa es un polímero lineal, producto de la condensación de D-glucopiranosas unidas por enlaces α (1-4) (Figura 1), los cuales constituyen un 99% de la molécula, mientras que los enlaces α (1-6) se encuentran en 1% (Jane, 2006). Tiene un peso molecular de aproximadamente 1×10^5 - 1.9×10^6 g/mol y su porcentaje en el gránulo de almidón es normalmente de 20-30%. Es soluble en agua a temperatura de 70 a 80°C (Buleon y col., 2000; Tester y col., 2004).

Aunque los acoplamientos α (1-4) son capaces de tener una rotación relativamente libre alrededor del enlace anomérico; la interacción del oxígeno con grupos hidroxilo cercanos a la cadena lineal, forma puentes de hidrógeno y tiende hacia una conformación helicoidal. Las cadenas extendidas helicoidales poseen una superficie interna similar a una cavidad relativamente hidrofóbica, por lo que, moléculas como lípidos y compuestos aromáticos, pueden interactuar fácilmente con esta superficie (Whistler y BeMiller, 1999; Mira y col., 2007).

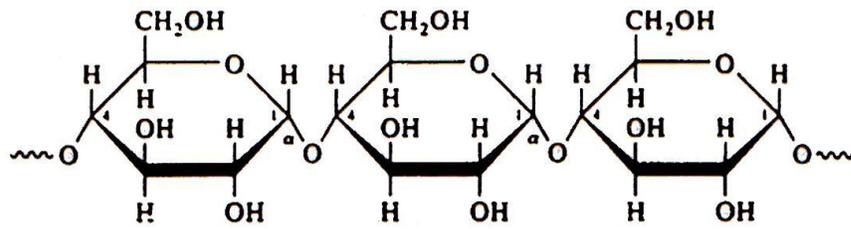


Figura 1. Estructura química de la amilosa

1.2 Amilopectina

La amilopectina es el componente mayoritario en los almidones. Se caracteriza por tener un gran número de ramificaciones, que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las ramas están unidas al tronco central por enlaces α (1-4) semejante a la amilosa, las ramificaciones se localizan cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa y están unidas por enlaces α (1-6) (Figura 2) (Bushuk; Lil y Yeh, 2001; Singh y col., 2003; Vermeylen y col., 2006a; Huang y col., 2007). En la literatura se ha encontrado que el peso molecular que presenta la amilopectina se encuentra en un intervalo de 7.0×10^7 a 5.7×10^9 g/mol (Hizukuri, 1986).

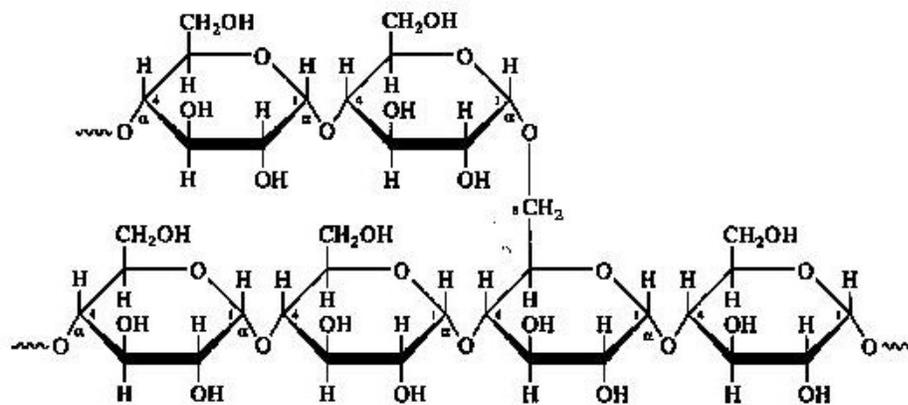


Figura 2. Estructura química de la amilopectina

1.3 Propiedades fisicoquímicas del almidón

En conjunto, la amilosa y la amilopectina, le confieren propiedades específicas al gránulo de almidón. Algunas propiedades fisicoquímicas de almidón son: cristalinidad, birrefringencia, solubilidad, absorción de agua y poder de hinchamiento.

1.3.1 Cristalinidad

El almidón es un material semi-cristalino, con una cristalinidad que se encuentra entre el 25-31% dependiendo de la especie vegetal, como se muestra en el Cuadro 2. La amilopectina es el principal componente responsable de la cristalinidad del gránulo de almidón, que es producida por la longitud y el ordenamiento de sus cadenas ramificadas, sin embargo, también depende del porcentaje de amilosa (Rindlav-Westling y col., Ratnayake y Jackson, 2006).

Muchas técnicas han sido utilizadas para elucidar la estructura de almidón. El análisis de difracción de rayos X y la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR) han sido empleadas para investigar la diferencia en la estructura cristalina y cristalinidad bajo diferentes condiciones. Una ruptura cristalina y una transición de tipo cristalino de -B o -C a tipo -A en almidones de tubérculos y raíz con tratamientos con humedad por calor, influye significativamente en la digestibilidad del almidón (Chang y Tae , 2015).

Cuadro 2. Cristalinidad del almidón, de acuerdo a la especie vegetal

| Almidón nativo | Cristalinidad relativa (%) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Maíz | 31 |
| Maíz céreo | 30.3 |
| Trigo | 31 |
| Arroz | 29.5 |
| Papa | 29.8 |

(Zhang y col., 2006)

1.3.2 Birrefringencia

La birrefringencia es la capacidad de refractar doblemente la luz polarizada. Cuando los gránulos de almidón son analizados bajo un microscopio con luz polarizada, se puede observar una sombra en forma de cruz, denominada “cruz de malta” (Thomas y Atwell, 1999).

Todos los gránulos de almidón en su forma nativa presentan birrefringencia que es proporcional a su estructura cristalina. Los patrones de birrefringencia en los gránulos de almidón representan la disposición radial de las moléculas de amilopectina y sus cadenas forman ángulos de 90 ° con los extremos reducidos en la dirección del hilo o centro del gránulo de almidón. Patrones de birrefringencia débiles son indicativos de la desorganización de la región cristalina. La pérdida de birrefringencia en gránulos de almidón está asociada con la deformación de éste debido a su modificación (Alcázar y Almeida, 2015).

1.3.3 Solubilidad en agua fría

El almidón es un biopolímero poco soluble debido a que la amilosa y la amilopectina se unen mediante puentes de hidrógeno, formando una estructura compleja, altamente organizada, que presenta una gran estabilidad a las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes, su solubilidad depende de la cantidad disponible de estos polímeros en el medio (Singh y Singh, 2003, Kaur y col., 2007).

Huang y col. (2007), estudiaron el efecto que tiene la agitación mecánica en las características fisicoquímicas y estructurales del almidón, encontrando que, a mayor tiempo de agitación mecánica, el almidón es más soluble en agua fría, debido a la disminución de las zonas cristalinas, permitiendo que a mayor cantidad de agua interaccione con el gránulo.

1.3.4 Absorción de agua

La cantidad de agua fría absorbida por el almidón dependerá del contenido de humedad del medio que lo rodea; el almidón absorbe agua hasta alcanzar el

equilibrio con el medio circundante (proceso reversible); la absorción de agua fría provoca que el gránulo presente un hinchamiento, incrementando el tamaño de su diámetro hasta un 10% (Seib y Stearns, 1972; Singh y Singh, 2003). La absorción de agua y la consiguiente hinchazón del gránulo de almidón contribuyen a la separación de fases de amilopectina-amilosa y pérdida de cristalinidad, lo que a su vez promueve la lixiviación de amilosa en el espacio intergranular. Cuando las moléculas de almidón se calientan en exceso de agua, la estructura semicristalina se rompe y las moléculas de agua se asocian mediante enlaces de hidrógeno a grupos hidroxilo expuestos en las moléculas de amilosa y amilopectina. Esta asociación provoca hinchazón y aumento del tamaño y la solubilidad de los gránulos (Alcázar y Almeida, 2015).

1.3.5 Poder de hinchamiento

La etapa de hinchamiento de los gránulos de almidón es el paso inicial de todas las demás características de la pasta. Inicialmente, la hinchazón de los gránulos es reversible, aumentando su volumen hasta un 30% (Gryszkin y col., 2014). La absorción de agua y el calentamiento de la dispersión de almidón rompen los enlaces de hidrógeno responsables de la cohesión de los gránulos, solubilizando parcialmente el almidón. El agua penetra en el interior del gránulo de almidón, hidratando los fragmentos lineales de amilopectina. Este proceso conduce a una hinchazón irreversible, aumentando el tamaño del gránulo varias veces y la viscosidad de la pasta. La viscosidad de la pasta es esencialmente la principal medida de la aplicación potencial del almidón en la industria (Gryszkin y col., 2014, Sarker y col., 2013).

El poder de hinchamiento de los gránulos de almidón esta relacionando directamente con el tamaño y contenido de amilosa y amilopectina. Cuanto más alto es el contenido de amilosa, más bajo es el poder de hinchamiento y menor es la fuerza del gel para la misma concentración de almidón (Thomas y Atwell, 1999; Ao y Jane, 2007).

La desorganización estructural de los almidones se explica mediante los estudios de gelatinización, plastificación y retrogradación.

1.3.6 Gelatinización

El almidón, cuando se calienta en presencia de exceso de agua, sufre una fase de transición conocida como gelatinización, y existe un intervalo de temperatura característico para la gelatinización correspondiente a cada especie de almidón. La gelatinización se produce cuando el agua se difunde en el gránulo, que a continuación se hincha sustancialmente debido a la hidratación de la fase amorfa (amilosa) ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos, ni rígidos como en las áreas cristalinas (amilopectina), causando pérdida de cristalinidad y orden molecular (Jiménez y col., 2012).

La gelatinización afecta las propiedades reológicas y la viscosidad de la pasta, haciendo que el gránulo de almidón sea más accesible a la acción enzimática. Cuando los gránulos de almidón se hinchan y sus componentes están en solución, las propiedades del medio cambian de una simple suspensión de gránulos de almidón a una pasta de almidón. El progreso de la gelatinización a lo largo del gránulo está determinado por las propiedades fisicoquímicas del almidón, la presencia de otros ingredientes, la disponibilidad de agua y los parámetros del proceso aplicados (es decir, la temperatura, el tiempo y la energía mecánica) (Shcirmer y col., 2015).

1.3.7 Viscosidad de almidones

La viscosidad es la resistencia que tienen las moléculas que conforman un líquido para separarse unas de otras, es decir, es la oposición de un fluido a deformarse y esta oposición es debida a las fuerzas de adherencia que tienen unas moléculas de un líquido o fluido con respecto a las otras moléculas del mismo líquido (Concepto definicion.de, 2014). El proceso de gelatinización viene acompañado de un incremento en la viscosidad por la transición de un estado ordenado y cristalino en el gránulo a un estado hidratado. La viscosidad de la dispersión dependerá de la

concentración de almidón y de la temperatura de transición o gelificación de cada almidón. En la Figura 3, se presenta el perfil característico de un almidón nativo; a medida que se incrementa la temperatura, se retiene mayor cantidad de agua y el gránulo empieza a hincharse, aumentando su volumen, una vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la cristalina inicia un proceso semejante, requiriendo mayor cantidad de energía.

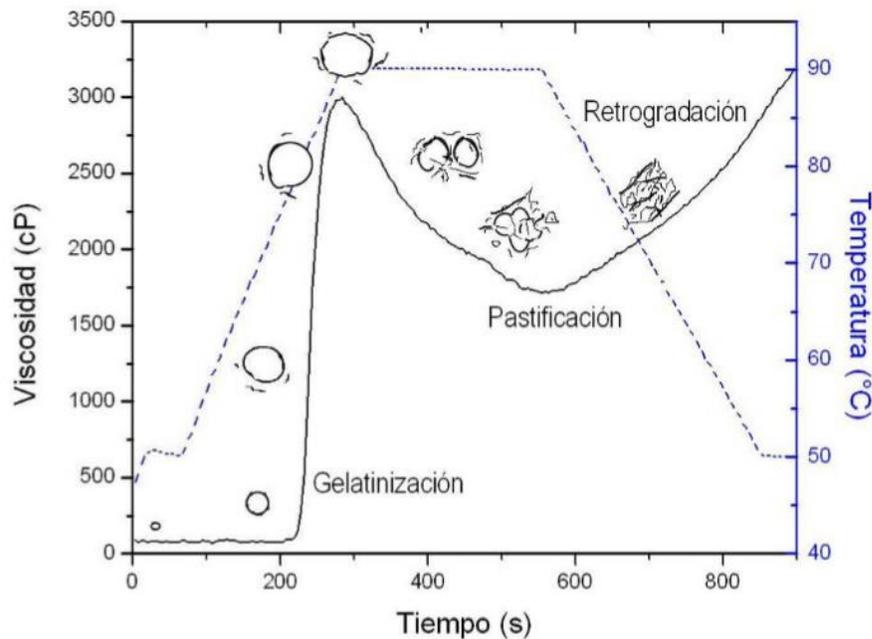


Figura 3. Perfil de viscosidad del almidón nativo (Sánchez,2007).

La temperatura de gelatinización depende de varios aspectos como es el porcentaje de amilosa, la forma del gránulo y el tamaño, por lo que cada almidón tiene un intervalo de gelatinización diferente, por ejemplo: para el almidón de maíz la temperatura de gelatinización se encuentra entre 62-72 °C, para el trigo entre 52-63°C, para el sorgo entre 68.5-75 °C y para la papa se encuentra entre 56-66 °C (Zhang, 2001; Li y Yeh, 2001; Wurzburg, 1986).

Al comparar las propiedades de los almidones de papa y maíz (Cuadro 3), se observa que conforme aumenta el tamaño de gránulo de almidón y disminuye el

porcentaje de amilosa, el gránulo absorbe mayor cantidad de agua, favoreciendo la gelatinización del almidón, disminuyendo la temperatura de gelatinización.

Cuadro 3. Características generales del almidón de maíz y de papa

| Tipo de almidón | Maíz | Papa |
|-------------------------------|---|--|
| Porcentaje de amilosa | 28% | 21% |
| Tamaño | 2-30 micras (μm) | 5-100 micras (μm) |
| Temperatura de gelatinización | 62-80 °C | 58-65 °C |
| Propiedades del gel | Tiene una viscosidad media, es opaco y tiene una tendencia muy alta a gelatinizar | Viscosidad muy alta, es traslúcido y tiene una tendencia a gelatinizar media a baja. |

(Whistler y BeMiller, 1999; Patel y Seetharaman, 2006)

El fósforo es de importancia primordial y está presente en el almidón en tres formas principales: ésteres de monofosfato, fosfolípidos y fosfato inorgánico. Los ésteres de monofosfato están asociados con la fracción de amilopectina por enlaces covalentes, aumentando la claridad y la viscosidad de la pasta, mientras que la presencia de fosfolípidos da lugar a pastas opacas y de baja viscosidad. El contenido de fosfolípidos en gránulos de almidón está relacionado proporcionalmente con la amilosa. Los fosfolípidos tienden a formar complejos con amilosa y ramas largas de amilopectina, dando como resultado gránulos de almidón con solubilidad limitada (Singh y col., 2003). La naturaleza del fósforo en gránulos de almidón tiene una influencia importante en la transmitancia de la pasta. Los almidones tales como el trigo y el arroz con alto contenido de fosfolípidos producen pastas con baja potencia de transmisión en comparación con las pastas de almidón de papa o de maíz porque los últimos almidones contienen menos fosfolípidos. El almidón de papa demuestra una alta transmitancia debido a su contenido de monoéster de fosfato (Alcázar y Almeida, 2015). Productos como el almidón de papa tienen transmitancias entre 42 a 96 % y se consideran pastas de alta claridad, seguidas de almidón de yuca a 51-81%. Los cereales comunes presentan generalmente transmitancias entre 13 y 62 % (Nuwamanya y col., 2013).

1.3.8 Temperatura de pastificación

Al llegar a cierta temperatura, el gránulo alcanza su volumen máximo y pierde tanto su patrón de difracción de rayos X, como la propiedad de birrefringencia; si se administra más calor por encima de la gelatinización, el gránulo hinchado, incapacitado para retener mayor cantidad de líquido se rompe parcialmente; en ese instante, la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en el seno de la solución (Whistler y BeMiller, 1999; Mira y col., 2007).

1.3.9 Retrogradación

Este fenómeno se define como la insolubilización y precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa. La retrogradación es la realineación de las moléculas, principalmente de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente e interaccionan entre sí, por múltiples interacciones de sus grupos hidroxilos, mediante puentes de hidrógeno (Morris, 1990; Biliaderis, 1991; Mira y col., 2007). En términos generales la retrogradación depende de la concentración y de la temperatura del sistema, la firmeza del gel aumenta y se favorece a bajas temperaturas, debido a la asociación de cadenas de amilopectina en el almidón (Karim y col., 2000; Morris, 1990).

Algunas investigaciones han demostrado que los componentes de pasta tales como las proteínas influyen en las propiedades de retrogradación de la pasta a través de la emulsificación. Las proteínas forman complejos con almidón que retardan el proceso de retrogradación durante el almacenamiento refrigerado (Wu y col., 2010). La presencia de otros componentes además de proteínas y lípidos, tales como otros carbohidratos, sales y polifenoles, afecta significativamente la retrogradación (Fu y col., 2015).

1.4 Modificación de almidones

La funcionalidad de un almidón varía dependiendo del uso al que se destine, por ejemplo: cuando un almidón se mezcla, éste solo se hidratará cuando la suspensión es calentada, proceso acompañado por un rápido incremento en la viscosidad. Algunos almidones como el de papa, son buenos agentes

estabilizadores y reguladores de la textura (Kaur y col., 2007; Cousidine, 1982), pero tienen limitaciones como baja resistencia a la compresión, resistencia térmica, y una alta retrogradación, estas desventajas inherentes han limitado el uso de estos almidones en algunas aplicaciones industriales. Cuando un producto presenta baja estabilidad, texturas indeseables y poca tolerancia al procesamiento, las aplicaciones tecnológicas del almidón nativo disminuyen. Sin embargo, al modificar un almidón, propiedades fisicoquímicas cambian por ende su aplicación. La modificación del almidón nativo, implica un cambio en las características físicas y químicas, mejorando así sus características funcionales (Hermansson y Svegmark, 1996; Kaur y col., 2007), tales como solubilidad, textura, adhesión y tolerancia a las temperaturas de calentamiento utilizadas en procesos (Sweedman, 2013).

Se han desarrollado varios métodos para producir almidones modificados con una variedad de características y aplicaciones. Todas estas técnicas alteran el polímero de almidón, lo que lo hace muy flexible y cambia sus propiedades físico-químicas y atributos estructurales para aumentar su valor para las industrias alimentarias y no alimenticias (López y col., 2010). Las modificaciones del almidón incluyen métodos físicos, químicos y enzimáticos. Los procedimientos físicos implican el uso de calor y humedad y las modificaciones químicas introducen grupos funcionales en la molécula de almidón usando reacciones de derivatización (por ejemplo, eterificación, esterificación) o implican reacciones de degradación (por ejemplo, hidrólisis y oxidación) (Yadav y col., 2013).

Los principales métodos para modificar almidones nativos se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Métodos para modificar almidones

| | | |
|-----------------------------------|---|--|
| Modificaciones químicas | Eterificación | Cationización Hidroalquilación Carboximetilación |
| | Esterificación | Acetilación Fosfatación |
| | Enlaces cruzados | |
| | Conversión | Enzimática Termomecánica Termoquímica |
| | Oxidación | Hipoclorito de sodio Peróxido de hidrógeno |
| | Hidrólisis | Ácida |
| | Piro-conversión | Dextrinización |
| (Neimo,1999) | | |
| Modificaciones físicas | Pregelatinización | |
| | Calor-humedad | |
| | Recocido Extrusión | |
| Modificaciones enzimáticas | α -Amilasa | |
| | β -Amilasa | |
| | Pululanasa | |
| | Isoamilasa | |
| | Cyclomaltodextrina D- Glucotransferasa | |
| (Cui,2005) | | |

Las modificaciones físicas del almidón pueden mejorar su solubilidad en agua y reducir el tamaño de los gránulos de almidón. Los métodos físicos para tratar los gránulos nativos incluyen: diferentes combinaciones de temperatura, humedad, presión, cizallamiento e irradiación. La modificación física de los gránulos de almidón es simple, barata y segura. Estas técnicas no requieren agentes químicos

o biológicos, por lo que se prefieren cuando el producto está destinado al consumo humano (Ashogbon y Akintayo, 2014).

1.5 Uso de los almidones modificados

El almidón modificado se utiliza en la industria alimentaria principalmente como modificador de textura, viscosidad, adhesión, retención de humedad, formación de gel y películas (Waterschoot y col., 2015). Además de proveer la calidad necesaria que el consumidor demanda, aumentando en ocasiones, la vida útil de un producto en el mercado.

Algunos de los alimentos en donde pueden encontrarse los almidones modificados son los siguientes: batidos y repostería, dulcería, rellenos, saborizantes/bebidas, salsas y espesantes, sopas, glaseados, carnes, alimentos para mascotas, botanas, pudines, derivados lácteos, entre otros (Jobling, 2004).

1.5.1 Almidones físicamente modificados

Las modificaciones físicas de almidón pueden aplicarse solas o con reacciones químicas para cambiar la estructura granular y convertir el almidón nativo en almidón soluble en agua fría o en pequeños cristales de almidón. El almidón soluble en agua fría es preparado por pregelatinización de una pasta de almidón nativo, seguido de un secado de tambor. Debido a la pregelatinización y el secado, la integridad granular se pierde y la viscosidad de la pasta se reduce. Los pequeños almidones granulares (diámetro < 5 μm) han sido utilizados como buenos sustitutos de grasa (W. Cui y col., 2005)

1.5.1.1 Pregelatinizados

El almidón pregelatinizado (PGS) es el almidón que ha sido sometido a un proceso de cocción hasta la gelatinización completa y un proceso de secado simultáneo (o posterior). Los métodos de secado incluyen secado por tambor, secado por pulverización y extrusión. La principal consecuencia de este tratamiento

es la destrucción de la estructura granular, lo que resulta en la fragmentación granular completa, y la ausencia de propiedades de birrefringencia. La propiedad más importante de los almidones pregelatinizados es que se hidratan instantáneamente además de aumentar su capacidad de hinchamiento, solubilidad y dispersión en agua fría. La funcionalidad del PGS depende de las condiciones de cocción, el secado y la fuente de almidón (Ashogbon y Akintayo, 2014).

En alimentos, el almidón se usa como agente de retención de humedad, espesante, y estabilizante de sistemas; además, es un aditivo de bajo costo (Colonna y col.,1984). De los almidones modificados físicamente, PGS se utiliza principalmente como un espesante en muchos productos instantáneos, como alimentos para bebés, sopas y postres, debido a su capacidad para formar pastas y disolver en agua fría. El uso de PGS se prefiere en alimentos sensibles porque no requiere calentamiento para formar una pasta (Majzoobi y col., 2011).

Para almidones que son usados como sustitutos de grasa, generalmente se logran mejores propiedades con los almidones pregelatinizados y las maltodextrinas, que son fracciones de las grandes cadenas de almidón (Giese,1992). Disponible en formas pregelatinizadas o instantáneas, los almidones generalmente se desempeñan bien en alimentos de alta humedad, tales como pastas de margarina, aderezos para ensaladas y salsas, productos horneados, glaseados y rellenos, y en emulsiones de carne como salchichas, pero generalmente no tienen buenos resultados en alimentos de baja humedad como galletas (Akoh, 1998). Las maltodextrinas se utilizan principalmente en la producción de alimentos deshidratados, ya que reducen la adherencia y mejoran la firmeza de dichos productos. Estas propiedades de las maltodextrinas resultan de su capacidad de absorción de agua, la capacidad de crear una barrera protectora en la superficie de las partículas absorbentes y la capacidad de aumentar la temperatura de transición vítrea (Valenzuela y Aguilera, 2015).

1.5.1.2 Gelatinizados

La gelatinización es un fenómeno producido por el calentamiento de gránulos de almidón en un medio acuoso, que lleva a romper el orden molecular y provoca cambios irreversibles. En la gelatinización el almidón absorbe agua, causando cambios reológicos y morfológicos al gránulo (Fennema, 1993). Durante el enfriamiento la dispersión de almidón gelatinizado adquiere, dependiendo de la concentración, una consistencia de pasta suave o gel. Cuando la pasta o gel se almacena por largos períodos de tiempo, las moléculas de amilosa tienen una tendencia fuerte a re-asociarse a través de la formación de enlaces de hidrógeno con moléculas de amilosa adyacentes. En otras palabras, los geles de almidón están en estado metaestable de no equilibrio y por lo tanto sufren una transformación de su estructura al presentarse una agregación de cadenas y recristalización durante el almacenamiento (Bello, 2001).

1.5.1.3 Tratamiento de calor-humedad

Los tratamientos de calor-humedad y recocado inducen la rápida migración o rearrreglo de las moléculas de amilosa en los gránulos para formar enlaces intermoleculares entre las moléculas de amilosa-amilosa o amilosa-amilopectina (Chung y col., 2009b).

El tratamiento calor-humedad es un tratamiento físico en el cual los almidones son tratados a varios niveles de humedad (<35%) por un cierto periodo de tiempo a una temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea, pero por debajo de la temperatura de gelatinización (Maache-Rezzoug y col., 2008).

Los tratamientos de calor-humedad de almidones de maíz, trigo, lenteja, frijol y papa no tienen efecto en la forma ni tamaño de los gránulos. Sin embargo, los patrones de dispersión de rayos X se ven alterados del tipo B- a A- (o C-) para almidones de papa después del tratamiento (Hoover y col., 1996).

Normalmente, los tratamientos calor-humedad incrementan la temperatura de gelatinización y disminuyen el poder de hinchamiento. La entalpia de gelatinización para los almidones tipo B (como el almidón de papa) disminuye. Esto indica que

algunas dobles hélices se desenredan después del tratamiento (Hoover y col., 1996).

El almidón de papa tratado por calor-humead puede ser utilizado para reemplazar el almidón de maíz en tiempo de escases y para mejorar la calidad de horneado (W. Chui y col., 2005).

1.5.1.4 Annealing (recocado)

Por otro lado, el annealing (ANN) es un tratamiento físico donde el almidón se coloca en un exceso de agua (>60% w/w) o un contenido de agua intermedio (40-55% w/w), a una temperatura entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de gelatinización por un cierto periodo de tiempo (Gomes y col., 2005; Jayakody y col, 2009).

Este tratamiento modifica las propiedades fisicoquímicas del almidón sin destruir la estructura del gránulo. El recocado incrementa la temperatura de gelatinización del almidón, disminuye el rango de temperatura de gelatinización y reduce el poder de hinchamiento. Los gránulos de almidón tratado contienen más regiones vítreas amorfas y mejor alineamiento de dobles hélices de amilopectina, resultando en la restricción de la hidratación de los gránulos de almidón durante la gelatinización. Almidones de papa y maíz muestran una disminución en el pico de viscosidad con un incremento en el inicio de la temperatura de hinchazón (Tester y col., 2000). Generalmente annealing reduce el poder de hinchamiento del almidón. Esta reducción se ve influida en gran medida por la interacción entre el grado de perfección cristalina y las interacciones amilosa-amilosa y/o amilosa-amilopectina. Tanto la perfección cristalina como las interacciones disminuyen la hidratación de las regiones amorfas del almidón, disminuyendo de este modo el hinchamiento granular. Esta hinchazón granular reducida debida a ANN se ha observado específicamente en el almidón de patata (Hoover y Vasanthan, 1994).

1.5.1.5 Extrusión

El proceso de extrusión consiste en comprimir el material para formar una masa semi-sólida bajo una variedad de condiciones controladas y forzarla a pasar por una abertura definida a una velocidad determinada. La temperatura en el extrusor puede ser tan alta como los 200°C, mientras que el tiempo de permanencia es corto (10-60 segundos). El cocimiento por extrusión es considerado un proceso de alta temperatura tiempo corto (HTST) por sus siglas en inglés (W. Cui y col., 2005). Este proceso puede ser utilizado para producir almidones pregelatinizados.

Los polímeros de almidón son degradados en pequeñas moléculas durante la extrusión. Los gránulos de almidón y su estructura cristalina son destruidos parcial o completamente, dependiendo de la relación amilosa-amilopectina y las variables de extrusión (humedad, temperatura, corte). Además, los almidones extruidos muestran un incremento en el índice de solubilidad en agua, indicando que el almidón ha sido degradado en pequeñas moléculas, pero el índice de absorción de agua disminuye. En cuanto a sus características de viscosidad, los almidones extruidos no presentan un pico de gelatinización durante el proceso de calentamiento en exceso de agua, mientras que los almidones nativos muestran rápidamente un pico de viscosidad con el inicio de la gelatinización (Colonna y col., 1989).

La extrusión ha sido utilizada en la industria alimenticia para manufacturar numerosos productos como cereales listos para comer, snacks, productos de confitería, proteína texturizada, macarrones, así como alimentos para animales (Harper y col., 1989).

1.5.2 Almidones químicamente modificados

Las modificaciones químicas más comunes son la oxidación, esterificación y eterificación (Cui, 2005). La modificación química de almidón provoca cambios en las propiedades físicas y químicas del almidón, reduciendo la temperatura de gelatinización, mejorando la claridad de las pastas, incrementando su resistencia a

la retrogradación, y proporcionando estabilidad durante los ciclos de congelación y descongelación (Sun y col., 2006).

Un proceso importante para la modificación del almidón es la oxidación, un proceso en el que grupos funcionales tales como grupos carboxilo y carbonilo se introducen en la molécula de almidón y despolimerizan la molécula. Durante la oxidación, es importante mantener los parámetros apropiados, como la temperatura y el pH. Los oxidantes reactivos utilizados incluyen peróxido de hidrógeno, ácido peracético, permanganato de potasio, hipoclorito de sodio, ácido crómico y dióxido de nitrógeno. En los últimos años, el almidón modificado por oxidación ha tenido un gran uso en la industria alimentaria para formar superficies y recubrimientos adherentes (Alcázar y Almeida, 2015).

La esterificación de almidón es una modificación en la cual un grupo hidroxilo se sustituye por un grupo éster. El nivel de sustituyentes de grupos hidroxilos a lo largo de las cadenas de almidón es expresado como grado medio de sustitución (DS) (Cui ,2005). Estos almidones son utilizados como retenedores y espesantes en sopas, snacks, y alimentos refrigerados debido a sus propiedades, como alto poder espesante, estabilidad congelación-descongelación, y baja temperatura de gelatinización (Trubiano,1986). Además de funcionar como estabilizadores de emulsiones (Solarek, 1986).

Por otro lado, pueden prepararse almidones eterificados por la reacción de sustitución nucleofílica, biomolecular o de tipo SN_2 de grupos hidroxilos en moléculas de almidón con sustancias reactivas como el óxido de propileno bajo condiciones alcalinas. En comparación con el almidón nativo, los almidones eterificados muestran propiedades físico-químicas útiles, como estabilidad térmica, actividad iónica, mayor eficiencia de reacción, etc. Los almidones eterificados pueden ser utilizados en muchas áreas como revestimiento, floculantes, fármacos, aditivos, elaboración de papel, entre otros (Chen y col., 2015).

1.6 Calentamiento óhmico

El calentamiento óhmico se produce cuando una corriente eléctrica pasa a través de un alimento, provocando la elevación de la temperatura interna debido al paso de la corriente eléctrica. Es rápido y tiene mayor capacidad de penetración que las microondas, lo cual hace que sea especialmente útil. Existe un gran número de aplicaciones del calentamiento óhmico que incluyen escaldado, pasterización, esterilización, descongelación, evaporación, deshidratación, fermentación y extracción, entre otras.

Las ventajas de este proceso se derivan del hecho de que el calentamiento tiene lugar en el interior del alimento, de este modo, y a diferencia de lo que ocurre en un calentamiento convencional, no existen superficies calientes de contacto. Este tipo de tratamiento evita sobrecalentamientos, lo que permite un menor deterioro en los constituyentes y una menor formación de depósitos (Gil, 2010).

La densidad, el tamaño y la forma de los alimentos son factores clave en la efectividad del calentamiento óhmico. Se ha comprobado que la velocidad de calentamiento es directamente proporcional a la intensidad del campo eléctrico y a la conductividad eléctrica del alimento. Los alimentos deben ser conductores, pero no demasiado. Los valores óptimos de conductividad a 20°C se encuentran en el intervalo 0.01-10 siemens/m (Villamiel, 2006). La conductividad eléctrica de los alimentos (Q) es fuertemente afectada por el contenido iónico (Wang y Sastry, 1993), la humedad (Palaniappan y Sastry, 1991) y las estructuras físicas y químicas de los alimentos (Bean y col., 1960; Sasson y Monselise, 1977).

El calentamiento óhmico proporciona un nuevo método de calentamiento y una nueva tecnología para el procesamiento de alimentos. Haden, De Alwis y Fryer (1990) estudiaron el cambio en una rodaja de patata durante el calentamiento óhmico. Sus resultados mostraron que los principales cambios en la conductividad eléctrica de la papa calentada se produjeron a 40-50 °C y 75-80 °C. Llegaron a la conclusión de que el cambio que tiene lugar a una temperatura más alta podría explicarse en términos de gelatinización del almidón. Palaniappan y Sastry (1991)

señalaron que el valor de conductividad eléctrica era mucho mayor durante el calentamiento óhmico que durante el calentamiento convencional debido a los efectos electro-osmóticos para los materiales biológicos (Fa-De Li y col., 2003).

Muchos métodos para medir la gelatinización del almidón se basan en cambios en la propiedad, tales como el aumento de la transmisión de luz (Beckord y Sandstedt, 1947), pérdida de la birrefringencia de los gránulos de almidón (Watson, 1964) y aumento de la viscosidad (Yasunaga, y col., 1968).

Wang y Sastry (1997), Chaiwanichsiri (2001), y Karapantsios (2000) han desarrollado métodos para la determinación de la temperatura de gelatinización mediante la medición de la conductividad eléctrica en mezclas de almidón calentado en forma óhmica (Morales y col., 2009).

1.6.1 Parámetros de operación en el calentamiento óhmico.

La potencia (P) proporcionada al sistema por el calentamiento óhmico a una temperatura preestablecida es calculada utilizando los valores de corriente (I) y voltaje (ΔV) durante el tiempo de calentamiento (Δt):

$$P = \Sigma V \cdot I \cdot (\Delta t)$$

O también se puede utilizar la siguiente ecuación (R=resistencia eléctrica, Ω):

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Debido a la corriente eléctrica que pasa a través del alimento bajo calentamiento, se generara un calor sensible que ocasiona que la temperatura del alimento incremente de una temperatura inicial (T_i , en $^{\circ}\text{C}$) a una temperatura final (T_f , en $^{\circ}\text{C}$), la cantidad de calor (Q, en kJ) aportada al sistema puede calcularse mediante la siguiente fórmula (donde m es la masa de la muestra en kg, C_p es el calor específico en $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$).

$$Q = (m)(C_p)(T_f - T_i)$$

El cálculo de la eficiencia energética (E) es una forma de evaluar el rendimiento del proceso de calentamiento mediante el método de calentamiento óhmico, se calcula mediante la siguiente fórmula (Sakr y Liu, 2014).

$$E = \frac{\text{Energía utilizada para calentar la muestra}}{\text{Energía total de entrada}} = \frac{(m)(C_p)(T_f - T_i)}{\Sigma} VI(\Delta t)$$

Uno de los parámetros más importantes en el proceso de calentamiento óhmico es la conductividad eléctrica (σ , con unidades S/m), esta se ve afectada por la temperatura, frecuencia, concentración de electrolitos, tamaño de partícula de los sólidos, gradiente de voltaje aplicado, etc. La conductividad eléctrica es un parámetro asociado totalmente al alimento. Dependiendo de las características del alimento se tendrá diferentes valores de conductividad eléctrica y representa la capacidad del material para disipar energía eléctrica es decir disipar la energía de la corriente eléctrica que atraviesa al alimento. A mayor conductividad eléctrica mayor será la temperatura interna del alimento la temperatura, esto es debido a que a una conductividad alta existe mayor corriente que atraviesa al alimento disipando más energía internamente. La presencia de sustancias iónicas tales como ácidos y sales incrementa la conductividad, por otro lado, la presencia de sustancias no polares tales como lípidos, disminuye la conductividad. La conductividad eléctrica (α) se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left(\frac{L}{A}\right) \left(\frac{I}{V}\right)$$

Donde L representa la distancia entre los electrodos (m), A es el área de sección transversal de los electrodos (m²), I es la corriente alterna aplicada (A), V es el voltaje aplicado (V).

El gradiente de voltaje utilizado tiene efecto sobre los tiempos de tratamiento en el calentamiento óhmico, la generación de calor por unidad de tiempo aumenta cuando el gradiente de voltaje aumenta, esto es debido a que la resistencia del alimento al paso de corriente a través de él para cualquier potencial aplicado está

relacionada con la composición del alimento y su conductividad eléctrica. El tipo de onda y frecuencia del voltaje aplicado afecta el valor de la conductividad eléctrica del alimento y por ende también de todo el proceso de calentamiento; la reducción de la frecuencia de la corriente alterna durante el calentamiento óhmico puede dar como resultado una mejor transferencia de masa. El contenido de sólidos totales, viscosidad, acidez y tamaño de partícula del alimento tiene efecto sobre la velocidad de calentamiento, de forma general se establece que en líquidos muy viscosos el calentamiento tiende a ser más rápido que en fluidos poco viscosos, aunque existen algunas excepciones, este conflicto se debe a que la duración del calentamiento óhmico depende de la composición química del alimento (Sakr y Liu, 2014).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Obtener y caracterizar almidones de papa pregelatinizados usando calentamiento óhmico.

2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar las condiciones de calentamiento óhmico que permitan obtener almidones de papa pregelatinizados.
- Evaluar el efecto del calentamiento óhmico en la obtención de almidones pregelatinizados de papa.
- Caracterizar las propiedades funcionales de los almidones de papa nativo y los pregelatinizados.

3. METODOLOGÍA

3.1 Almidón de papa

Las muestras se disolvieron en agua destilada en una relación almidón nativo: agua de 50:100, 60:100, 70:100 (p / v), con lo cual se obtiene una pasta con 50, 40 y 30 % de humedad, respectivamente. Posteriormente se colocaron a 90°C durante 5 minutos en agitación constante para obtener almidones solubilizados.

3.2 Contenido de amilosa

El contenido de amilosa del almidón de papa nativo fue determinado usando el kit de ensayo comercial MEGAZYME siguiendo el procedimiento determinado por el fabricante y la metodología AOAC 996.11 (2006) y AACC 76.11 (1976).

3.3 Calentamiento óhmico

Las muestras solubilizadas se colocaron dentro de celdas de calentamiento óhmico construidas con nylamide. El equipo de calentamiento óhmico utilizado fue construido en el CICATA-IPN Unidad Querétaro. El equipo consta de una celda con electrodos para calentamiento, dos multímetros conectados para medir el Voltaje V y la corriente I, un medidor de temperatura con un sensor de temperatura tipo T aislado con vidrio y un transformador variable para aplicar el voltaje alterno a la celda. La figura 4 muestra un diagrama esquemático del equipo por calentamiento óhmico utilizado.

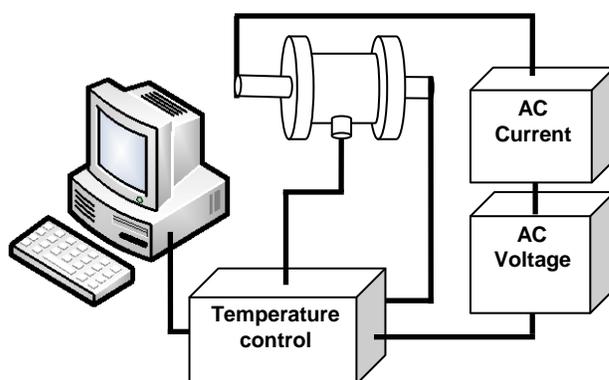


Figura 4. Diagrama esquemático del equipo de calentamiento óhmico utilizado.

El almidón a tratar se colocó en la celda de calentamiento de nylamide y se aplicaron diferentes voltajes (110, 120 y 130 V) hasta alcanzar una temperatura de 100 °C dentro de las muestras medidos por el termopar. El voltaje aplicado se controló de manera manual. Una vez que las muestras alcanzaron la temperatura deseada, las muestras se secaron a 52 °C durante 24 horas. Posteriormente fueron molidas y tamizadas por una malla de 60 micras, y empacadas en bolsa de polietileno, etiquetadas y selladas.

Posteriormente fueron molidas y tamizadas por una malla de 60 micras, y empacadas en bolsa de polietileno, etiquetadas y selladas.

3.4 Propiedades de pasta

Para determinar el perfil de viscosidad de las dispersiones de los almidones, se empleó el método 61-02 de la AACC (2000). Se usó un reómetro de la marca Anton Paar para determinar el perfil de viscosidad Modelo 301; se usaron 2 g de cada muestra de almidón modificado por calentamiento óhmico y se adicionó agua destilada hasta obtener un peso final de 20 g. Se utilizó un agitador a una velocidad de 169 rpm a una temperatura de 50°C durante 2 minutos para estabilización de temperatura y una distribución homogénea de partículas de las muestras. Cada muestra se llevó a 92°C con una tasa de incremento de 5.6°C/min, manteniendo la temperatura durante 5 minutos y continuando con un enfriamiento a 50°C con una tasa de 5.6°C/min. A partir de los perfiles de viscosidad se determinaron los valores de viscosidad máxima (cP), viscosidad mínima (cP), viscosidad final (cP).

3.5 Índice de solubilidad en agua e índice de absorción de agua.

Estas características fisicoquímicas fueron determinadas, usando el método reportado por Anderson y col. (1982), que permite cuantificar la cantidad de agua incorporada a la muestra y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua a 30 °C. Para ello se colocó 1 g de la muestra de almidón en un tubo de centrifuga previamente pesado. A cada tubo se le adicionaron 10 mL de agua destilada.

Posteriormente, los tubos se colocaron en agitación a 30°C por 30 minutos y se centrifugaron a una velocidad de 3000 rpm durante 10 minutos.

Para el índice de solubilidad en agua (ISA) se midió el sobrenadante de cada tubo y se transfirieron a charolas de aluminio previamente pesadas. Las muestras se colocaron en una estufa a 110°C durante 2 horas hasta evaporar todo el líquido. El ISA se determinará mediante la ecuación:

$$ISA = \frac{A}{C} \times 100$$

Donde: A= sólidos disueltos

C= peso de la muestra seca

Para determinar el índice de absorción de agua (IAA) se pesó el tubo con la muestra húmeda y por diferencia se obtuvo el peso del sedimento. El IAA se expresó como el cociente de gramos de agua y gramos de muestra seca:

$$IAA = \frac{\textit{peso del sedimento}}{\textit{peso de la muestra seca} - ISA}$$

3.6 Capacidad de absorción de aceite

Representa la cantidad de aceite adsorbida por 100 g de concentrado proteico. Se agregó un exceso de aceite (10mL) a 1g de muestra en tubos graduados de centrifuga, los cuales se agitaron en un Vortex por un minuto; luego se colocaron a 30°C por 30 min en agitación constante y posteriormente se centrifugaron a una velocidad de 3000 rpm durante 10 minutos, para medir el volumen de aceite excedente (Granados y col., 2014).

$$\textit{Indice de absorción de aceite} = \frac{\textit{peso del sedimento}}{\textit{peso de la muestra seca}}$$

3.7 Calorimetría diferencial de barrido

El estudio de calorimetría diferencial de barrido se realizó con un equipo TA Instruments, el cual fue previamente calibrado con indio. Se pesaron 3 mg de muestra directamente en las charolas de aluminio, posteriormente se adicionó 7 μ L de agua con una microjeringa para obtener una suspensión entre 65 y 75 % (p/p) de humedad (base seca). Las charolas de aluminio con la muestra se sellaron con una prensa y se calentaron en el equipo desde 30 a 100 °C a una velocidad programada de 10 °C/min. Por medio del termograma se obtuvieron los parámetros de gelatinización como son: temperatura de inicio (T_o), temperatura de pico (T_p) y entalpía de gelatinización (ΔHG) (Narváez y col., 2006).

3.8 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Se utilizó el método reportado por Paredes-López y col., (1989). Las muestras de almidón fueron espolvoreadas sobre una cinta conductora de cobre de doble adhesión, la cual fue fijada previamente en un soporte de aluminio del microscopio electrónico de barrido. La muestra se cubrió con una capa de carbón de 30 nm. Las muestras se colocaron en el microscopio (modelo PHENOM PRO) y se observaron a 200x, 1600x y 4000x.

3.9 Diseño estadístico

Se usó un diseño factorial 2^3 , los factores analizados fueron: voltaje (110, 120 y 130 V) y humedad (50, 40 y 30%). El análisis estadístico se realizó mediante la aplicación de un análisis de varianza, con un nivel de significancia de 0.05. Al encontrar diferencias estadísticas significativas se aplicará la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con el programa MiniTab 2016.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de amilosa en almidón de papa nativo

El contenido de amilosa en el almidón de papa nativo se muestra en el Cuadro 5. El resultado de amilosa experimental fue de 26.95 %, siendo un valor cercano a lo reportado en la bibliografía, clasificándose como un almidón normal. La amilosa es el componente minoritario en el gránulo de almidón. Según su contenido, los almidones pueden ser clasificados en diferentes grupos como son los almidones cerosos, que tienen muy poca cantidad de amilosa, alrededor de 1-2%; los normales que contienen entre 17-24% de amilosa y los altos que contienen 70% o más de este polímero (Tang y col., 2002). El almidón de papa según lo reportado por Vermeylen y col. (2006) contiene un porcentaje de amilosa de 22%. Por otro lado, M. Kapelko y col. (2012) reportaron un contenido de amilosa para almidón de papa nativo de 25.82%.

Cuadro 5. Contenido de amilosa en almidón de papa nativo

| Amilosa experimental (%) |
|---------------------------------|
| 26.95 ± 2.47 |

4.2 Calentamiento óhmico

En la Figura 5, se presentan los conductigramas obtenidos del almidón de papa que se procesaron por calentamiento óhmico. En la gráfica se muestra el efecto del voltaje y la humedad sobre la conductividad de las soluciones de almidón, teniendo que a mayor humedad en la muestra (50:100 p/v) la conductividad será mayor, alcanzando la temperatura deseada (100°C) en menor tiempo. De igual manera, el voltaje tuvo un efecto importante, siendo inversamente proporcional al tiempo de procesamiento, ya que se puede observar que a menor voltaje (110 V) tomara más tiempo en llegar a los 100 °C.

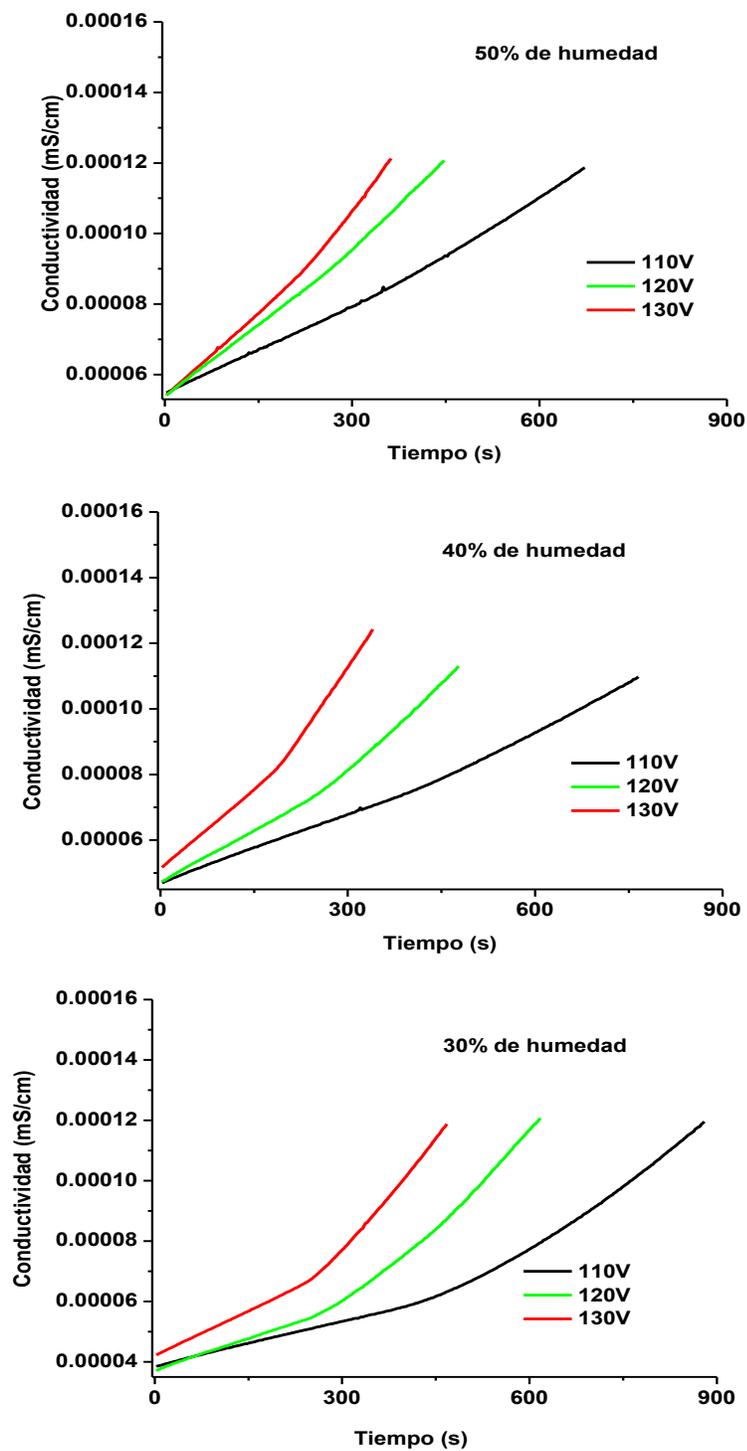


Figura 5. Conductigramas de almidón de papa por calentamiento óhmico por lote a diferentes porcentajes de humedad a) 50 % de humedad, b) 40% de humedad, c) 30 % de humedad.

El comportamiento de la conductividad eléctrica en función de la concentración de almidón se estudió previamente por Morales y col. (2009). Los autores mencionan que altos niveles de agua en el almidón, provoca que se solubilice por completo y forma nuevos enlaces de hidrógeno que aumentan la conductividad, lo que coincide con lo encontrado en el presente trabajo.

A bajas humedades se produce lo que se conoce como Heat-moisture treatment (HTM), que es una modificación física que implica niveles de humedad generalmente en un rango restringido de 10-30%, y calentamiento a altas temperaturas (90-120 ° C) para periodos de menos de 15 min a 16h (Chung y col., 2009b) valores que se encuentran dentro de los que se usaron para procesar el almidón de papa por calentamiento óhmico. HMT permite el control de la movilidad molecular a altas temperaturas limitando la cantidad de agua, disminuyendo de esta manera la conductividad, resultados que coinciden para los almidones tratados con 30% de humedad. Se ha encontrado que los cambios inducidos por HMT en la estructura y propiedades del almidón varían con la fuente de almidón y el contenido de amilosa (Maache-Rezzoug y col., 2008),

Aunado a esto, a una humedad elevada y mayor voltaje, el efecto en tiempo es menor para alcanzar la temperatura deseada y por lo tanto lo que se esperaría es que se tenga menor grado de gelatinización en el almidón. Sin embargo, la humedad tuvo un efecto significativo en la gelatinización del almidón.

Los resultados que se encuentran en el Figura 6, muestran que la humedad tuvo un efecto significativo sobre los valores de potencia, siendo la humedad directamente proporcional a la potencia, ya que se proporciona mayor energía a los tratamientos con alta humedad (50% de humedad), y menor energía a aquellos con baja humedad (40 y 30 % de humedad), sin considerar las diferencias en cuanto al voltaje aplicado. Cuando se aplican diferentes voltajes se tiene diferentes potencias, y la potencia influye en la razón de calentamiento; a mayor potencia más rápido se calienta es decir mayor razón de calentamiento (Gaytán Martínez y col., 2012), alcanzando los 100 °C en menor tiempo.

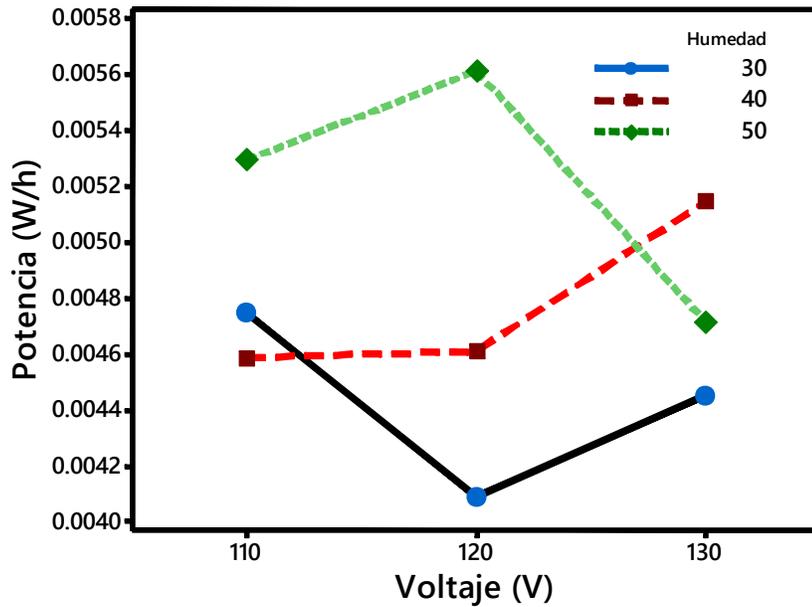


Figura 6. Efecto de las variables de proceso en la potencia requerida para obtener almidones pre-gelatinizados usando calentamiento óhmico.

4.3 Perfil de viscosidad de almidón de papa por calentamiento óhmico

En la Figura 7 se muestra el perfil de viscosidad de almidones de papa procesados por calentamiento óhmico procesados a diferentes voltajes y humedades. La humedad fue la variable de proceso que tuvo efecto significativo sobre la viscosidad máxima, mínima y final de los almidones procesados usando calentamiento óhmico. La humedad es un parámetro que influye en el grado de gelatinización de los almidones, lo cual se ve reflejado en el perfil de viscosidad. El perfil de viscosidad depende en gran parte del grado de gelatinización de los gránulos de almidón y de la velocidad de descomposición molecular (Carvalho y col., 2010).

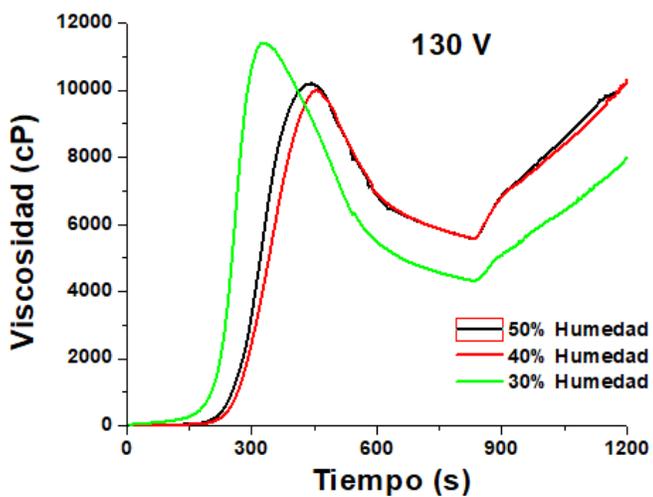
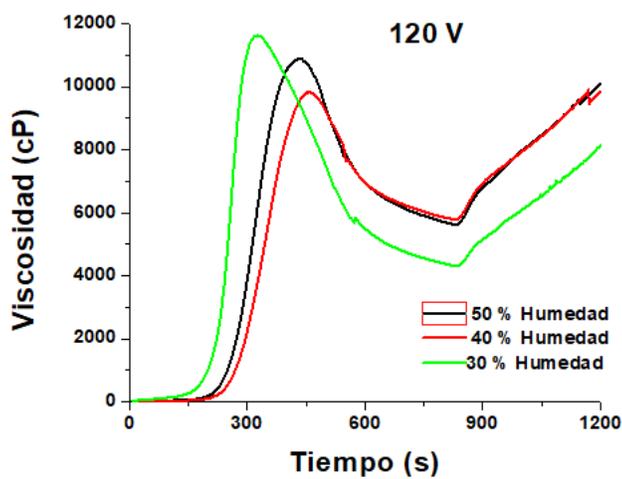
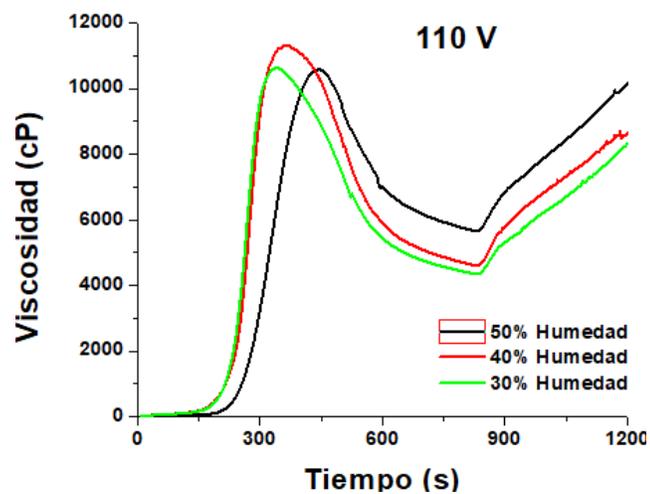


Figura 7. Viscoamiliogramas de almidón de papa por calentamiento óhmico por lote a diferentes voltajes

En el Cuadro 6 se encuentran los valores de viscosidad máxima, viscosidad mínima, y viscosidad final para las curvas de viscosidad obtenidas de almidones de papa tratados por calentamiento óhmico.

Cuadro 6. Valores de viscosidad máxima (cP), viscosidad mínima (cP), y viscosidad final (cP) para almidones de papa tratados por calentamiento óhmico

| Voltaje (V) | T pasting (°C) | t pasting (s) | Viscosidad maxima (cP) | t visc. max(s) | Viscosidad minima (cP) | t visc. min(s) | Viscosidad final (cP) |
|--------------------|----------------|---------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|------------------------------|
| 50% humedad | | | | | | | |
| 110 | 62.47±0.30 | 187±2.82 | 10618.54±51.86 ^{de} | 441±2.83 | 5727.98±116.70 ^a | 832±1.41 | 10376.26±157.07 ^a |
| 120 | 63.6±0.0 | 198±0.0 | 10903.55±3.48 ^{cd} | 433±0.0 | 5578.26±28.18 ^a | 832±1.41 | 10075.49±114.67 ^a |
| 130 | 63.68±0.67 | 198.5±6.36 | 10269.74±55.19 ^{ef} | 445±2.83 | 5574.56±14.32 ^a | 829±0.0 | 10495.27±65.19 ^a |
| 40% humedad | | | | | | | |
| 110 | 61.05±0.07 | 174±0.0 | 11190.05±147.00 ^{bc} | 362±1.41 | 4504.82±113.73 ^b | 833±0.0 | 8963.24±79.34 ^b |
| 120 | 65.83±0.0 | 219±0.0 | 9814.55±3.54 ^g | 458±1.41 | 5776.44±3.78 ^a | 832±1.41 | 10227.30±157.52 ^a |
| 130 | 65.15±0.07 | 212±0.0 | 10107.06±168.93 ^{fg} | 453±2.83 | 5612.82±58.30 ^a | 831±0.0 | 10333.22±36.49 ^a |
| 30% humedad | | | | | | | |
| 110 | 60.4±0.0 | 168±0.0 | 10619.72±9.95 ^{de} | 344±1.41 | 4286.80±59.16 ^{bc} | 832±1.41 | 8346.54± 14.48 ^c |
| 120 | 59.90±0.03 | 163±0.0 | 11586.26±41.83 ^a | 326±1.41 | 4311.33±9.68 ^{bc} | 833±0.0 | 8362.76±175.05 ^c |
| 130 | 59.95±0.21 | 164±2.82 | 10269.74±55.19 ^{ef} | 329±2.83 | 4227.92±75.58 ^c | 832±1.41 | 8165.43±59.89 ^c |
| Nativo | 65.8±0.0 | 217±0.0 | 10151.72±68.03 | 275±2.83 | 1858.44±35.59 | 827±8.29 | 3719.855±19.04 |

*T pasting= temperatura de pegado; *t pasting= tiempo para alcanzar la temperatura de pegado; *t visc. max = tiempo para alcanzar la viscosidad máxima; *t visc. min = tiempo para alcanzar la viscosidad mínima.

La temperatura de pasting (o de pegado), es la temperatura a la cual tiene lugar la hinchazón inicial de los gránulos de almidón cuando se suspende en agua e inicia el aumento de viscosidad (Ward y Mudford, 2008). El impacto de annealing (ANN) en las propiedades de pegado del almidón es muy controvertido. Según el estudio realizado por Stute (1992) y Jacobs y col. (1995), ANN aumenta la temperatura de pasting y la viscosidad final del almidón de papa, mientras que su viscosidad máxima disminuye, lo que concuerda con los resultados obtenidos (Cuadro 6) a altos niveles de humedad (50 y 40 % de humedad de las muestras tratadas a 120 V y 130 V). El efecto de ANN en las propiedades de pegado de almidón depende principalmente de las características estructurales del almidón y de las condiciones de análisis. Basado en el trabajo de Gomes y col (2005), el fortalecimiento de la

unión promovido por ANN indica que se requerirá una temperatura más alta para gelatinizar los gránulos de almidón. Adebowale y col. (2009) también informaron que el aumento de la temperatura de pegado después de los tratamientos hidrotermales apoya el hecho de que el proceso de modificación tiende a aumentar la región de cristalinidad como resultado de la reorientación de los gránulos de almidón. El fortalecimiento de las fuerzas ligadas intragranulares da como resultado que el almidón requiera más calor antes de que ocurra la desintegración estructural y la formación de pasta.

Los valores de las temperaturas de pasting de los almidones tratados con mayor humedad (63°C) son cercanos a los de almidón nativo (65°C). Por otro lado, las muestras con menor humedad (30%) exhiben una menor temperatura de pegado, alrededor de los 59°C, junto con un incremento en su viscosidad máxima y una disminución en su viscosidad mínima y final (al igual que el tratamiento de 40% humedad y 110V), además de requerir menos tiempo para alcanzar su temperatura de pasting. Bajas temperaturas de pegado indican que los almidones tratados con estas condiciones tienden a absorber agua rápidamente (Yueming y col., 2017).

Los tratamientos a 120 V y 130 V presentaron un comportamiento similar, pudiendo observar el efecto de la humedad. Las muestras con mayor humedad (50 y 40 %) obtuvieron una viscosidad máxima menor, mientras que las de 30% de humedad mostraron una viscosidad máxima más alta. La viscosidad máxima representa la máxima capacidad que tiene el gránulo de almidón de absorber agua, hasta antes de la disrupción del gránulo. La viscosidad aumenta a medida que los gránulos se hinchan, seguida de una disminución de su viscosidad máxima conforme se van desintegrando los gránulos y hay una realineación de los polímeros (Saunders y col., 2011; Wang y Weller, 2006). Entre más tiempo tarda en alcanzar la viscosidad máxima y los rangos de temperatura de pegado son más amplios, podría deberse al desarrollo de complejos de amilosa-lípidos, la perfección de la región cristalina ordenada y la estabilización del área de amorfos en el almidón después del tratamiento, lo que restringe el colapso de los gránulos y retiene más agua (Yueming y col., 2017).

En cuanto a los valores de viscosidad mínima y viscosidad final, no se observa diferencia significativa para humedades de 40 y 50 % de las muestras tratadas con 120 y 130 V, excepto el tratamiento de 40% de humedad y 110V. El tiempo que toma alcanzar la viscosidad mínima en todos los tratamientos no mostro diferencias significativas. Durante los tratamientos aplicados la viscosidad mínima fue mayor en comparación con el almidón nativo, el cual pudo ser debido a que los gránulos ya se encontraban en su mayoría dispersos o completamente lixiviados y así comenzaban con el proceso de recristalización (Schirmer y col., 2015). Dependiendo de la velocidad de calentamiento, los almidones recocidos pueden resistir mejor el calor y la agitación mecánica que los almidones nativos (Serrano y Franco, 2005), lo que concuerda con los datos obtenidos en el presente trabajo.

Las muestras con menor humedad (30%) presentaron valores de viscosidad mínima y viscosidad final más bajos. La viscosidad final (VF) es el parámetro más comúnmente usado para definir la calidad de una muestra particular, ya que indica la habilidad del material para formar una pasta viscosa o un gel después del cocimiento y enfriamiento, así como su comportamiento durante el almacenamiento (Gaytán-Martínez y col., 2012). El aumento de la viscosidad final puede ser el resultado de la unión de las cadenas de amilosa y el aumento de la masa molecular, que puede conducir a una retrogradación acelerada. Valores bajos de VF, indican mayor estabilidad a la cocción y enfriamiento, por ende, menor tendencia a la retrogradación (An y King, 2006), lo que se puede observar con tratamientos a baja humedad. La retrogradación implica una recristalización rápida de moléculas de amilosa seguido de una recristalización lenta de moléculas de amilopectina (Colussi y col., 2017). El obtener bajos valores de retrogradación implica un beneficio cuando se usan los almidones para incorporarse en algún alimento, debido a que no se genera sinéresis.

4.4 Calorimetría diferencial de barrido

Con el fin de identificar los cambios que ocurrieron durante la modificación física del almidón y conocer las causas de las diferencias en las propiedades reológicas, el almidón nativo y el almidón tratado por calentamiento óhmico se analizaron por calorimetría diferencial de barrido o DSC (por sus siglas en inglés). En el Cuadro 7 se muestran los valores de las propiedades térmicas de almidón de papa pregelatinizado usando calentamiento óhmico. Se determinó la temperatura de inicio (T_o), pico (T_p) y final (T_f), así como la entalpía de gelatinización de éstas para explicar de forma detallada el efecto de las variables de proceso sobre el fenómeno de la gelatinización.

La transición de gelatinización se puede observar como un pico endotérmico, este proceso fue afectado de manera significativa por la humedad y voltaje (Cuadro 8). Los valores de entalpía estuvieron entre 0.11 ± 0.00 J/g (120 V y 40% humedad) a 1.51 ± 0.14 J/g (110 V y 30% humedad). El almidón nativo presentó un valor de entalpía de 11.57 ± 2.57 J/g, lo que coinciden con lo reportado por Kapelko y col. (2012) siendo la temperatura inicial de 60.42°C , pico de 65.63°C , final de 73.10°C y la entalpía de 14.01 J/g.. En cuanto a la entalpía, se puede observar que los almidones tratados con humedad de 40 y 50% fueron las que presentaron los menores valores, respecto con almidón de papa nativo. Los valores bajos de entalpía se han asociado con un alto porcentaje de gelatinización, lo cual corresponde a los resultados encontrados. Los almidones procesados a 40 y 50 % de humedad presentaron los mayores valores de gelatinización respecto a los de menor humedad (30%), lo cual es evidencia de mayor transformación del gránulo de almidón. Este parámetro representa la disociación de las dobles hélices de la amilopectina y la fusión de los cristales del almidón (López y col., 2008).

La temperatura de inicio (T_o) de los almidones tratados por calentamiento óhmico se observó entre $50-60^\circ\text{C}$ para las muestras tratadas con 40 y 50% de humedad, mientras que aquellas tratadas con menor humedad (30%) no presentaron diferencias significativas en cuanto a T_o , respecto al almidón nativo. Qi y col. (2004)

indicaron que las temperaturas de gelatinización representan la facilidad con la cual el agua puede penetrar los gránulos e hidratarlos, lo cual es un evento que precede a la gelatinización. Singh y col. (2001) indicaron que altos valores de temperatura de inicio y pico de gelatinización se deben a la naturaleza compacta de los gránulos pequeños y alto grado de orden molecular de los gránulos, así como altas longitudes de cadena de amilopectina. La temperatura de transición de gelatinización está relacionada con el grado de cristalinidad del almidón (Singh y col., 2003). Un aumento en la temperatura de transición (T_p) es proporcional al aumento de cristalinidad del almidón lo que provoca mayor estabilidad en el almidón y por ende lo hace más resistente a la gelatinización (Quintanar y col., 2009). Los resultados obtenidos sugieren que el porcentaje de humedad afecta el incremento de la temperatura de gelatinización. Además, las temperaturas de transición de gelatinización del almidón han sido asociadas al grado de cristalinidad del almidón, lo que las relaciona, a su vez, al grado de estabilidad estructural de los gránulos de almidón (Guzmán y col., 2011; Singh y col., 2003).

Como se observa en el Cuadro 7, las muestras con humedades de 50% y 40% así como tratados con 120 y 130 V, mostraron un segundo endoterma. La transición se presentó 63 y 74°C, y los valores de entalpía de gelatinización fueron significativamente menores respecto con el primer endoterma. Lo anterior puede sugerir que un número de dobles hélices presentes en las regiones cristalinas y no cristalinas se destruyeron durante el tratamiento, lo que coincide con lo que reporta Huang y col. (2015). Por lo que, el segundo endoterma podría ser debido a la fusión de los cristales más fuertes que se formaron como resultado de las interacciones amilosa-amilosa y amilosa-amilopectina durante la desramificación que acompaña a la retrogradación (Perera y col., 1997). La figura 8 presenta las dos endotermas para una muestra de 120 V y 50% de humedad.

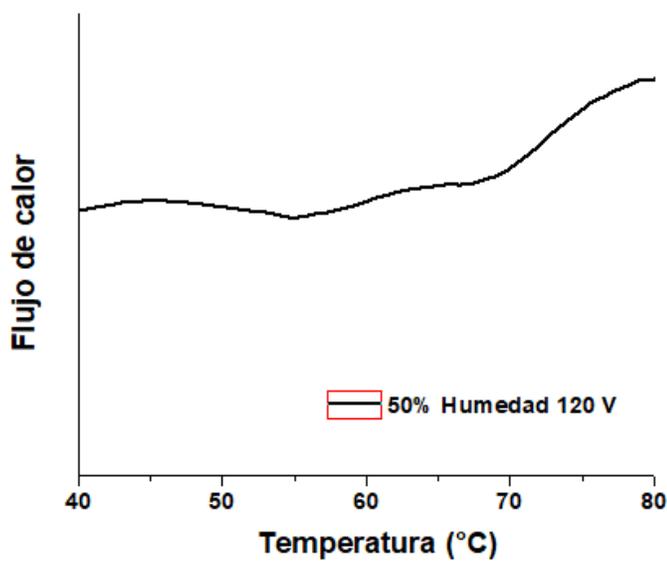


Figura 8. Muestra a 50% de humedad y 120 V con dos endotermas

El rango de temperatura de gelatinización ($T_f - T_o$) fue mayor en casi todos los casos comparado con el almidón nativo, sugiriendo que la mayoría de la estructura semicristalina y una extensión considerable de la región cristalina concentrada se destruyeron durante los tratamientos. La diferencia se puede deber al grado de heterogeneidad de los cristales (Gunaratne y col., 2002). Se obtuvieron valores más altos de rango de temperatura de gelatinización en las muestras con humedad de 30%, lo que indica que este tratamiento puede aumentar la estabilidad de los cristalitos y hacer más formación de enlaces de hidrógeno entre inter e intrahélice, además puede aumentar la heterogeneidad de los cristales en los gránulos, formando así los cristalitos con diferentes estabilidades (Wongsagonsup y col., 2008).

El HMT influye en la temperatura de inicio (T_o), la temperatura pico (T_p), la temperatura final (T_f) y la entalpía de gelatinización (ΔH) del almidón. Estos se ven afectados por el nivel de tratamiento, la fuente de almidón y el contenido de amilosa. Los resultados obtenidos a baja humedad (30%) concuerdan con lo reportado para tratamientos HMT. Las temperaturas de inicio, pico y final de la gelatinización generalmente aumentan a medida que aumenta la intensidad del calor y la humedad. El aumento de T_o , T_p y T_f se ha atribuido a cambios

estructurales en los gránulos de almidón, que implican interacciones amilosa-amilosa y amilosa-lípidos (Hoover y Vasanthan., 1994). Después de tratamiento HMT, las interacciones amilosa-amilosa y amilosa-lípido reducen la movilidad de la región amorfa. Como resultado, los almidones tratados con calor y humedad requieren una temperatura más alta para que se produzcan la hinchazón y la ruptura de las regiones cristalinas, lo que lleva a un aumento de T_o , T_p y T_f . La reducción de ΔH promovida por HMT ha sido reportada en papa. Esto es el resultado de la interrupción de las dobles hélices presentes en las regiones cristalinas y no cristalinas de los gránulos (Gunaratne y Hoover., 2002).

Cuadro 7. Efecto de los parámetros de procesos en las propiedades térmicas de almidón de papa pregelatinizado usando calentamiento óhmico

| Voltaje | Endoterma 1 | | | | Endoterma 2 | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | To(°C) | Tp (°C) | Tf (°C) | ΔH (J/g) | To (°C) | Tp (°C) | Tf(°C) | ΔH (J/g) | ΔT (°C)* | Gel (%)** |
| Humedad 50% | | | | | | | | | | |
| 110 | 57.60±7.08 ^a | 62.66±7.76 ^a | 68.61±8.24 ^a | 0.24± 0.04 ^{abc} | NA | NA | NA | NA | 11.01±1.16 ^{ab} | 97.92±0.36 ^a |
| 120 | 52.09 ±0.7 ^{cd} | 56.25±1.30 ^b | 61.45±0.18 ^a | 0.16 ± 0.04 ^{ab} | 63.5±2.17 ^a | 69.15±0.0 ^a | 73.94±0.77 ^a | 0.24±0.07 ^a | 9.36±0.84 ^{ab} | 98.61 ± 0.36 ^a |
| 130 | 48.60±0.80 ^d | 54.7±0.55 ^b | 61.15±0.71 ^a | 0.31±0.07 ^{abcd} | 63.77±0.13 ^a | 68.60±0.43 ^a | 74.04±0.50 ^a | 0.30±0.09 ^a | 12.57±1.52 ^{ab} | 97.32 ± 0.67 ^a |
| Humedad 40% | | | | | | | | | | |
| 110 | 56.11± 9.11 ^a | 63.22±6.50 ^a | 69.31±6.88 ^a | 0.96±0.52 ^{cd} | NA | NA | NA | NA | 13.19±2.24 ^{ab} | 91.70 ± 4.52 ^a |
| 120 | 55 ±2.50 ^{bc} | 58.08±0.82 ^b | 62.17±0.07 ^a | 0.11± 0.0 ^a | 64.08±0.63 ^a | 69.07±0.58 ^a | 73.88±1.40 ^a | 0.30±0.16 ^a | 7.17±2.55 ^b | 99.04 ± 0.0 ^a |
| 130 | 51.60±2.72 ^{cd} | 57.50±2.83 ^b | 62.23±1.20 ^a | 0.15± 0.02 ^{ab} | 63.74±1.58 ^a | 68.39±1.07 ^a | 74.41±0.58 ^a | 0.55±0.49 ^a | 10.62±1.51 ^{ab} | 98.70 ± 0.18 ^a |
| Humedad 30% | | | | | | | | | | |
| 110 | 59.26±0.60 ^{ab} | 67.36±0.16 ^a | 74.43±0.25 ^a | 1.51 ± 0.14 ^d | NA | NA | NA | NA | 15.16±0.33 ^a | 86.94 ± 1.28 ^a |
| 120 | 60.45±0.41 ^{ab} | 67.47±1.64 ^a | 75.40±3.25 ^a | 1.41±0.88 ^{bcd} | NA | NA | NA | NA | 14.95±3.65 ^a | 87.81 ± 7.63 ^a |
| 130 | 60.5± 1.00 ^{ab} | 66.49± 0.0 ^a | 73.93±0.10 ^a | 0.95±0.23 ^{abcd} | NA | NA | NA | NA | 13.43±1.11 ^{ab} | 91.83 ± 2.01 ^a |
| Nativo | 60.70±0.23 | 64.49±0.09 | 69.86± 0.57 | 11.57±2.57 | NA | NA | NA | NA | 9.18±0.81 | NA |

*ΔT= Tf-To del endoterma 1; Gel= al porcentaje de gelatinización respecto al almidón nativo, en el endoterma 1. NA= No aplica

4.5 Índice de absorción y solubilidad de agua e índice de absorción de aceite

En el Cuadro 8 se muestran los valores de índice de absorción de agua, índice de solubilidad e índice de absorción de aceite para las muestras de almidón de papa tratadas a diferente humedad y voltaje por calentamiento óhmico. Se puede observar que no se tuvo efectos significativos por las variables de proceso, sin embargo los valores obtenidos fueron significativamente mayores respecto al almidón nativo. Los almidones procesados por calentamiento óhmico presentaron valores de $5.40 \pm 0.53\%$ (30% de humedad y 130 V) a $3.90 \pm 0.20\%$ (40% humedad y 120V) de IAA, en tanto que para el almidón nativo su IAA fue de 1.86 %, lo que indica que los almidones tratados por calentamiento óhmico tienen una fácil dispersión en agua fría.

El índice de absorción de agua es una medida del volumen ocupado por el almidón después de la hinchazón en un exceso de agua, el cual se pudiera traducir como a una mayor absorción de agua tiene una mayor hinchazón el gránulo, por lo que si el gránulo está más hinchado este puede retener más agua. Cuando el almidón es pre-gelatinizado, su estructura cristalina se interrumpe debido a la ruptura de enlaces de hidrógeno, que da como resultado grupos hidroxilo más expuestos para formar enlaces de hidrógeno con agua, teniendo la capacidad de absorción en agua fría (Liu y col., 2017). Las muestras con menor contenido de humedad (30%) obtuvieron los valores de IAA más altos. Por otro lado, las muestras con 40 - 50% de humedad presentaron un valor de IAA más bajo, lo que podría explicarse por una mayor degradación de la molécula de almidón.

La electroporación de la membrana del almidón podría explicar este fenómeno, debido a que ocasiona una mayor lixiviación de los componentes del gránulo principalmente de amilosa. Esto podría deberse a un tiempo prolongado de exposición al campo eléctrico con poca agua (An & King, 2007; Camargo et al., 2010; Lima & Sastry, 1999; Palaniappan & Sastry 1991).

El índice de solubilidad en agua (ISA), es una indicación del grado de conversión del almidón y la degradación molecular, mide la cantidad de componentes solubles liberados (Jiangping y col., 2017). En cuanto a los valores de ISA obtenidos no hubo diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, se observa un incremento de éste respecto al almidón de papa nativo (0.34%). El almidón pregelatinizado aumenta la solubilidad en agua tras la dispersión en agua fría; esto conduce a "suspensiones instantáneas de almidón" sin calentamiento (Ashogbon y col., 2014), por lo que la estructura porosa del almidón pregelatinizado puede absorber más fácilmente agua en comparación con el almidón nativo, así como una mayor solubilización (Slaughter 2001). Zazueta-Morales y Morales-Sánchez (2005) reportaron que al usar calentamiento óhmico en el procesamiento de almidones pregelatinizados no se aplica una fuerza al corte por lo cual solo ocurre una lixiviación parcial de la amilosa. Por esta razón los componentes del almidón se degradan levemente y probablemente siguen enlazados dentro de una matriz continua, lo que hace que se presente una alta accesibilidad al agua, aunado a la uniformidad del calentamiento que se presenta durante el uso del CO y solamente una limitada solubilidad en agua fría (debido a los componentes de alto peso molecular), lo que explicaría los resultados encontrados. Éstos resultados deberían ser evaluados mediante diversas técnicas como cromatografía de baja presión, mejor conocida como filtración en gel y la cromatografía de líquidos de alta resolución, ya que han sido utilizadas para el estudio de la estructura molecular de los componentes del almidón y de esta manera poder comprender los bajos índices de solubilidad (Atwell y col., 1980; MacGregor y col., 1984). De igual manera, la solubilidad reducida del almidón recocado se debe a un fortalecimiento de los enlaces entre la amilosa y la amilopectina o entre las moléculas de amilopectina, evitando la lixiviación de los gránulos (Gomes y col., 2005).

El índice de absorción de aceite presentó un ligero aumento en las muestras tratadas en comparación con el almidón nativo (1.89 %). Murúa-Pagola y col. (2009) observaron un aumento de la retención de aceite en almidones fosfatados por extrusión. Los autores mencionan, que los grupos fosfato causan una retención

de aceite más fuerte que los grupos acetilo. Thiebaud y col. (1997) y Zhang y col. (1997) reportaron el alargamiento de las cadenas de carbono y el aumento de los niveles de sustitución como las causas del aumento de la hidrofobicidad debido a la modificación química. Sin embargo, los índices de absorción de aceite discutidos por Marzena y col., (2016) indican que un tratamiento hidrotérmico diferenció los almidones más fuertemente que la modificación química, mostrando propiedades de formación y estabilización de emulsiones. De esta manera, se puede decir que una modificación física incrementa de igual manera la retención de aceite, lo cual llevaría a una disminución de costos al aumentar el rendimiento de productos elaborados a partir de estos almidones modificados.

La aplicación de diferentes voltajes en las muestras no presentó efecto significativo sobre el índice de absorción y solubilidad en agua e índice de absorción de aceite, ya que se puede observar que no hay diferencia significativa entre los tratamientos (Cuadro 8). Sin embargo, las muestras procesadas con 30% de humedad fueron las que presentaron los valores más altos.

Cuadro 8. Valores de índice de absorción de agua, índice de solubilidad e índice de absorción de aceite para almidones de papa tratados por calentamiento óhmico

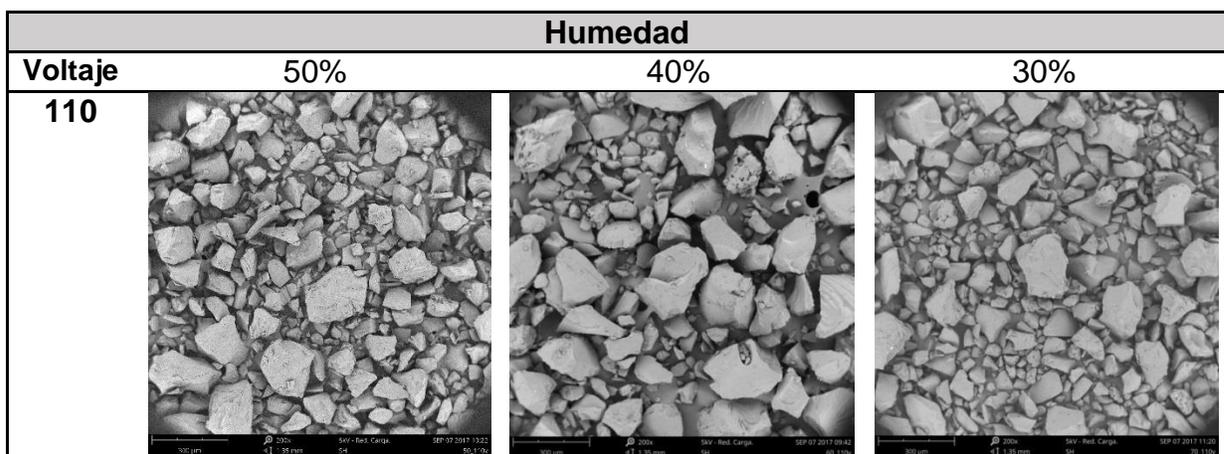
| Humedad (%) | Voltaje (V) | IAA (%) | ISA (%) | Iaceite (%) |
|---------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 50 | 110 | 4.23 ± 0.03 ^a | 1.06 ± 0.03 ^a | 2.07 ± 0.04 ^a |
| | 120 | 4.26 ± 0.16 ^a | 1.28 ± 0.28 ^a | 2.22 ± 0.17 ^a |
| | 130 | 4.39 ± 0.42 ^a | 1.19 ± 0.14 ^a | 2.12 ± 0.02 ^a |
| 40 | 110 | 4.63 ± 1.30 ^a | 1.25 ± 0.21 ^a | 2.15 ± 0.00 ^a |
| | 120 | 3.90 ± 0.20 ^a | 1.60 ± 0.0 ^a | 2.14 ± 0.07 ^a |
| | 130 | 3.94 ± 0.15 ^a | 1.47 ± 0.15 ^a | 2.15 ± 0.10 ^a |
| 30 | 110 | 5.33 ± 0.46 ^a | 1.51 ± 0.46 ^a | 2.27 ± 0.05 ^a |
| | 120 | 5.21 ± 0.71 ^a | 1.73 ± 0.38 ^a | 2.23 ± 0.03 ^a |
| | 130 | 5.40 ± 0.53 ^a | 1.37 ± 0.07 ^a | 2.27 ± 0.01 ^a |
| Nativo | - | 1.86 ± 0.01 | 0.33 ± 0.05 | 1.89 ± 0.04 |

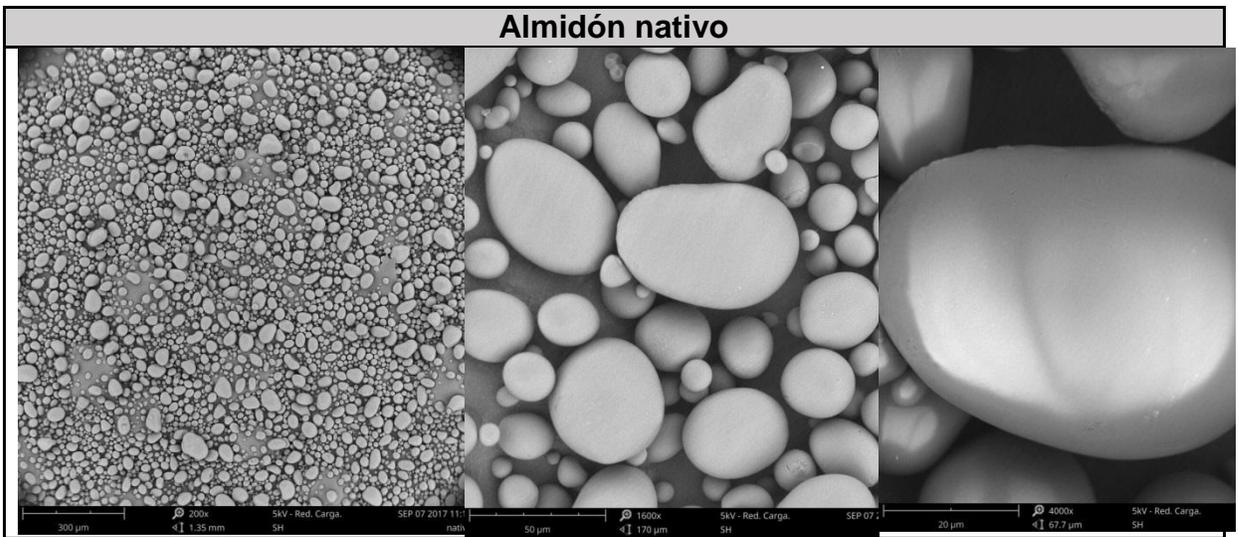
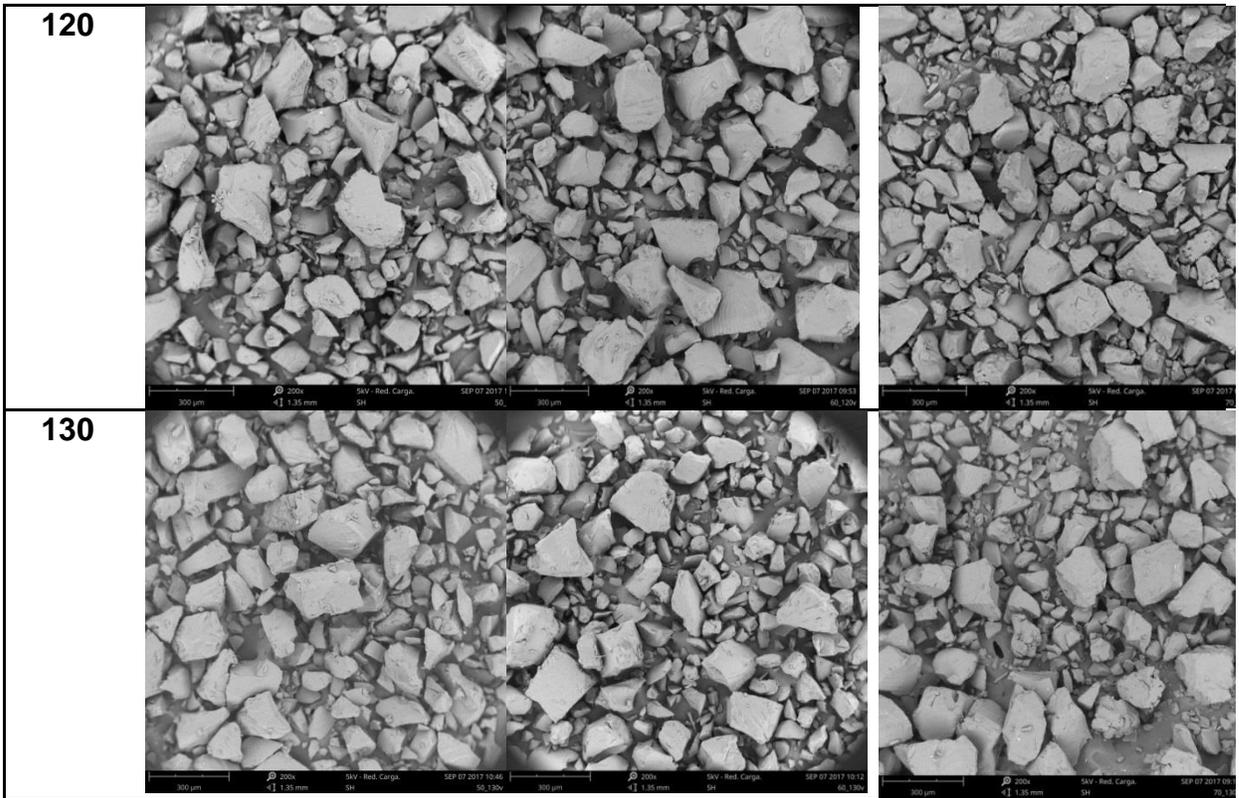
4.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La Figura 9 presenta las micrografías obtenidas por microscopia electrónica de barrido (SEM) de las muestras tratadas por calentamiento óhmico y de almidón de papa nativo.

Las micrografías electrónicas de barrido de los gránulos de almidón nativos mostraron formas redondas y ovaladas sin evidencia de fisuras o grietas, lo cual coinciden con las imágenes reportadas por Chang y col. (2015). Sin embargo, en todas las muestras sometidas a calentamiento óhmico no se logra observar los gránulos de almidón. Lo que se observa son aglomerados que mostraron grietas en la superficie y formas irregulares. Estos resultados pudieron haber sido causados por la hinchazón y la alteración de los gránulos de almidón por las abundantes moléculas de agua al aplicar un voltaje (Fannon y col, 2004), provocando una degradación, indicando la destrucción total de los gránulos y pérdida de su estructura. A pesar de que se hizo incidir un campo eléctrico a través de la muestra, no se presenta electroporación en ninguno de los tratamientos y no se observa diferencia entre ellos.

Figura 9. Micrografías de almidón de papa tratados por calentamiento óhmico





4.7 Correlación de Pearson y componentes principales de las variables analizadas

Este parámetro fue medido en cuatro zonas de la curva de viscosidad; en el primer cambio de pendiente (inicial), viscosidad máxima, viscosidad mínima y viscosidad final. Los dos primeros miden la viscosidad de los gránulos cuando gelatinizan y los dos últimos miden la viscosidad cuando se da el enfriamiento posterior a la gelatinización, representando fenómenos diferentes. La unidad de medida de la viscosidad utilizada en este estudio son Unidades Relativas de Viscosidad (RVU). Una unidad de RVU equivale a 12 Pa.s. La viscosidad máxima indica el punto en el que la mayoría de los gránulos de almidón alcanzaron su máximo hinchamiento, después del cual se da el colapso, por tanto, es indicador de la capacidad de atrapamiento de agua (Zheng y col., 1999; Beta y col., 2001; Wang y Wang, 2002).

En el Cuadro 9 presenta la matriz de correlaciones entre las variables independientes analizadas. La viscosidad máxima presentó una correlación positiva significativa con la temperatura inicial, pico y final de la transición de gelatinización (DSC) así como el índice de absorción de agua. En tanto que la viscosidad media y final y la entalpía presentaron una correlación negativa con ΔH .

Si se toma en cuenta que la temperatura es una medida de la velocidad media de las moléculas, se necesita que las moléculas de agua se muevan a mayor velocidad para que puedan atravesar las barreras que presentan los gránulos de alto grado de compactación y así provocar que el gránulo gelatinice. Lo anterior indica que la temperatura requerida para gelatinizar depende de la rapidez con que se lleva a cabo el proceso de difusión de agua dentro del gránulo, por tanto, entre más rápida sea la absorción del agua dentro del gránulo, menor temperatura requerirá para gelatinizar.

Cuadro 9. Coeficientes de correlación entre los parámetros físicos

| Variable | Vmax | Vmin | Vf | To | Tp | Tf | ΔH | IAA | ISA | IA | ΔT |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|------------|
| Vmax | 1 | | | | | | | | | | |
| Vmin | -0.789* | 1 | | | | | | | | | |
| Vf | -0.742* | 0.973* | 1 | | | | | | | | |
| To | 0.639 | -0.756* | -0.809* | 1 | | | | | | | |
| Tp | 0.691* | -0.878* | -0.879* | 0.958* | 1 | | | | | | |
| Tf | 0.739* | -0.907* | -0.888* | 0.926* | 0.990* | 1 | | | | | |
| ΔH | -0.695* | 0.956* | 0.913* | -0.735* | -0.875* | -0.904* | 1 | | | | |
| IAA | 0.758* | -0.940* | -0.917* | 0.732* | 0.839* | 0.893* | -0.914* | 1 | | | |
| ISA | 0.585 | -0.700* | -0.586 | 0.356 | 0.532 | 0.587 | -0.696* | 0.651 | 1 | | |
| IA | 0.548 | -0.752* | -0.812* | 0.515 | 0.566 | 0.587 | -0.692* | 0.784* | 0.642 | 1 | |
| AT | 0.661 | -0.857* | -0.729* | 0.509 | 0.723* | 0.796* | -0.884* | 0.864* | 0.768* | 0.514 | 1 |
| GEL | -0.695* | 0.956* | 0.913* | -0.735* | -0.875* | -0.904* | 1 | -0.914* | -0.696* | -0.692* | -0.884* |

P <0.05*. Vmax= Viscosidad máxima, Vmin= Viscosidad Mínima, Vf= Viscosidad final, To= Temperatura inicial; Tp= Temperatura pico, Tf= Temperatura final; ΔH = Delta H; IAA= Índice de absorción de agua, ISA= Índice de solubilidad en agua; IA= índice de absorción de aceite; ΔT = Diferencia de temperatura (Tf-To); Gel= Porcentaje de gelatinización

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para los valores de las variables analizadas. Se logra explicar 87.6% de la variación de los datos en los dos primeros componentes principales.

El CP1 contiene dos variables con coeficiente positivo, que corresponden a la Tf y el IAA, en tanto que la Vmin, Vf, entalpía y el porcentaje de gelatinización contribuyeron de manera significativa en forma negativa. El CP2 contenía como variables importantes: To y Tp de forma positiva, así como ISA y delta T de forma negativa (Cuadro 10). Las muestras se separaron en los 4 cuadrantes como se muestra en la Figura 10.

Cuadro 10. Análisis de componentes principales (ACP)

| <i>Variable</i> | <i>CP1</i> (79.6%) | <i>CP2</i> (8%) |
|-----------------|-----------------------|--------------------|
| <i>Vmax</i> | 0.258 | -0.009 |
| <i>Vmin</i> | -0.319* | 0.046 |
| <i>Vf</i> | -0.309* | -0.080 |
| <i>To</i> | 0.264 | 0.548* |
| <i>Tp</i> | 0.299 | 0.347* |
| <i>Tf</i> | 0.308* | 0.258 |
| ΔH | -0.312 | 0.054 |
| <i>IAA</i> | 0.310* | -0.060 |
| <i>ISA</i> | 0.233 | -0.579* |
| <i>IA</i> | 0.244 | -0.277 |
| ΔT | 0.279 | -0.289* |
| <i>GEL</i> | -0.312* | 0.054 |

Se encontraron comportamientos diferentes; en el cuadrante I y IV de la Figura 10 están representadas aproximadamente 60% de las muestras. El cuadrante II y III contiene aquellas muestras procesadas con baja humedad (30%) solamente se observa la muestra procesada con 40% y voltaje de 110V en el cuadrante II.

El contraste es presentado por los cuadrantes I y IV contra el II y III de la Figura 10; dicho contraste se da principalmente por el contenido de humedad. En tanto que la agrupación por el voltaje se da de la siguiente manera: muestras procesadas con voltajes 120 y 130 con humedad de 50 y 40% se ubican en el cuadrante IV, es decir son las muestras con mayor porcentaje de gelatinización. Las muestras con voltaje de 110 y 120 y humedad de 30% se ubican en el cuadrante II y III.

5. CONCLUSIONES

- Se lograron obtener almidones pregelatinizados de papa por medio de calentamiento óhmico modificando sus propiedades fisicoquímicas.
- El voltaje y la humedad de las muestras son parámetros importantes para la obtención de almidones pregelatinizados por calentamiento óhmico.
- La humedad fue el parámetro que tuvo efecto significativo en la obtención de almidones pre gelatinizados.
- La humedad de 30%, independientemente del voltaje aplicado permitió obtener almidones de papa pregelatinizados.
- La muestra tratada a 40% de humedad y 110 V se comportó como aquellas a humedad de 30%.
- Las muestras con 40 y 50% de humedad y con voltajes de 120 y 130 V permitieron obtener almidones gelatinizados.
- El análisis de componentes principales confirma que, aunque el voltaje es importante, la humedad es el factor determinante del grado de gelatinización de las muestras por calentamiento óhmico.

6. REFERENCIAS

- Adebowale**, K. O., Henle, T., Schwarzenbolz, U., & Doert, T. Modification and properties of African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa* Hochst. Ex. A. Rich.) Harms starch. I: Heat moisture treatments and annealing. *Food Hydrocolloids*, 23, **2009**. 1947–1957.
- Alcaráz**, S., Almeida, M. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources: a review. Universidad Estatal de Campinas, Brazil. *Food Science and Technology*. **2015**.
- Alvis** A., Vélez C.A., Villada H.S., y Mendoza M.R. Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas. *Información tecnológica* 19. **2008**. pp. 19-28.
- Akoh**, C. Fat Replacers. Institute of food technologists. **1998**. 47-53
- An**, H.J., & King, J.M. Thermal characteristics of ohmically heated rice starch and rice flours. *Journal of Food Science* .**2007**. 72(1), 84–88.
- Ashogbon**, A. O., & Akintayo, E. T. Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: a review. *Starch/Staerke*, **2014**. 66(1-2), 41-57.
- Atwell**, W.A., Hosney, R.C. and Lineback, D.R. Debranching of wheat amylopectin. *Cereal Chemistry*. **1980**. 57, 12-16.
- Averous**, L. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review. *J. Macromol. Sci., Part C: Polym.Rev.* **2004**: 44, 231-274
- Averous**, L; Moro, L.; Dole, P.; Fringant, C. Properties of thermoplastic blends: starch-polycaprolactone. *Polymer*. **2000**: 41, 4157-4167
- Bean**, E. C., Rasor, J. P. & Porter, G. C. Changes in electrical conductivities of avocados during ripening. *Yearbook of the Culiforniun Avocado Society*. **1960**. 44. 75-78.

Beckord, O. C. & Sandstedt, R. M. Starch gelatinization studies. I. Simplified equipment for the study of starch gelatinization by means of light transmission. *Cereal Chemistry*. **1947**. 24, 250-258.

Bello, L.A., Tovar, J. Actualización en química y nutrición del almidón. Editorial COFAA. Instituto Politécnico Nacional, CEPROBI; Morelos, México. **2001**. pp 13-14.

Bhandari, B.R. and T. Howes. Implication of Glass Transition for the Drying and Stability of Dried Foods. *Journal of Food Engineering*, **1999**.40: 71-79.

Biliaderis, C.G. The structure and interactions of starch with food constituents. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* **1991**. 69,60-78.

Bratskaya, S., Schwarz, S., Petzold, G., Liebert, T. and Heinze, T. Cationic starch of high degree of functionalization:12. Modification of cellulose fibers towards high filler technology in papermaking. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **2006** :7374-7379

Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S. Starch granules: structure and biosynthesis. **1998** :85-112

Bushuk, W. In *Rye: Production, Chemistry and Technology*. Second edition. (Ed. Bushuk, W.) American Association of cereal chemists Inc. (AACC) St. Paul, Minnesota, USA. Chapter 5. **2001**

Camargo, K.M., Alves, S.C., Martins, A.A.O., & Vessoni, T.Ch.P. Ohmic heating a review. *Trends in Food Science Technology*. **2010**. 21, 436–441.

Carvalho, C.W.P., Takeiti, C.Y., Onwulata, C.I., & Pordesimo, L.O. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *J. Food Eng.* **2010**. 98, 103–109.

ConceptoDefinicion.de. Definición de viscosidad. [Monografía de internet] 2014 [Consultado el 27 de diciembre de 2016]. Disponible en: www.conceptoDefinicion.de/viscosidad

Chang, L., Tae, W. Structural characteristics of slowly digestible starch and resistant starch isolated from heat-moisture treated waxy potato starch. Elsevier. Carbohydrate Polymers. **2015**. 200-205

Chen, Q., Yu, H., Abdin, Z., Chen, Y., Wang, J., Zhou, W., Yang, X., Khan, R., Zhang, H. and Chen, X. Recent progress in chemical modification of starch and its applications: Review. Royal Society of Chemistry. **2015**. 67459-67474.

Chronakis, L.S. On the molecular characteristics, compositional properties and structural-functional mechanisms of maltodextrins. Critical Reviews in Food Science, **1998**. 38, 599-637.

Chung, H. J., Liu, Q., & Hoover, R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. Carbohydrate Polymers. **2009b**. 75, 436–447.

Colonna, P., A. Buleo, and C. Mercier. Physically modified starches. In: Starch: Properties and Potential. Galliard, T. (ed). Critical Rep. Appl. Chem. **1987**.13: 79-114.

Colonna, J. and Mercier, C. Extrusion cooking of starch and starchy products. American association of cereal chemists. **1989**. 247-320.

Colussi, R., Kaur, L., Zavareze, E. da R., Dias, A.R.G., Stewart, R.B., & Singh, J. High pressure processing and retrogradation of potato starch: Influence on functional properties and gastro-small intestinal digestion in vitro. Food Hydrocoll. **2017**. 75, 131–137.

Cousidine, D.M. Foods and food production encyclopedia. New York: Wiley. **1982**. pp 142.

Descamps, N., S. Palzer, Y.H. Roos and J.J. Fitzpatrick. Glass Transition and Flowability/Caking Behaviour of Maltodextrin DE 21. Journal of Food Engineering **2013**.119: 809-813.

D'Ercole, A.D. Process of Preparing frozen pudding composition. U.S Patent. **1972**. 669-687.

Fa-De, L., Li-Te, L., Zaigui, L., Eizo, T. Determination of starch gelatinization temperatura by ohmic heating. Elsevier.Journal of food engineering. **2003**. 113-114.

Fennema OR. Química de los alimentos. 2nd ed. España: Acribia Editorial. **1993**.p233–6.

Frediksson H., Silverio J., Andersson R., Eliasson A.C., y Aman P. The influence of amylose and amilopectin characteristics on gelatinisation and retrogradation properties of different starches. Carbohydrates polymers .1998.35, pp. 119-134.

Fu, Z., Chen, J., Luo, S. J., Liu, C. M., & Liu, W. Effect of food additives on starch retrogradation: a review. Starch/Staerke. **2015**. 67(1-2), 69-78

Gaytán-Martínez, M., Figueroa, J. D. C., Vázquez-Landaverde, P. A., MoralesSánchez, E., Martínez-Flores, H. E., & Reyes-Vega, M. L. Physicochemical, functional, and chemical characterization of nixtamalized corn flour obtained by ohmic heating and traditional process. CyTA - Journal of Food.**2012**. 10(3), 182–195.

Giese, J. Developing low-fat meat products. Food Technology. **1992**. 100-108.

Giese, J. Fats, oils, and fat replacers. Food Technology. **1996**. 78-84.

Gil, H.A. Sánchez, F. Tratado de nutrición. 2da edición. Madrid: Médica panamericana. **2010**. PP. 538

Gomes, A. M. M., Silva, C. E. M., & Ricardo, N. M. P. S. Effects of annealing on the physicochemical properties of fermented cassava starch (polvilho azedo). Carbohydrate Polymers .**2005**. 60, 1–6.

Granados, C., Guzmán, L.E., Acevedo, D., Díaz, M., Herrera, A. Propiedades funcionales del almidón de Sagu (Maranta arundinacea). Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. Scielo. **2014**.

Gryszkin, A., Zieba, T., Kapelko, M., & Buczek, A. Effect of thermal modifications of potato starch on its selected properties. *Food Hydrocolloids*.**2014.** 40, 122-12

Gunaratne, A., Hoover, R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydr. Polym.* **2002.**49, 425-437.

Harper, J. Food extruders and their applications. *American association of cereal chemists*. **1989.** 1-15.

Hermansson, A. M, and Svegmark, K. Developments in the understanding of starch functionality. *Trends in Food Science and Technology*. **1996.** 7,345-353.

Hizikuri, S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*.**1986.** 147:342-347

Hobbs, L. Sweeteners from Starch. In *Starch. Chemistry and Technology*, 3ra edición. Academic Press, Amsterdam.**2009**

Hodge, S. & Osman, M. Carbohydrates. In O. R. Fennema (Ed.), *Food chemistry, principles of food science* .**1976,** pp. 102–114.

Hoover, R., & Vasanthan, T. The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat,oat, potato and lentil starches.*Journal of Food Biochemistry*. **1994.** 17, 303–325.

Hoover, R. and Manuel, H. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches. *Journal of cereal science*. **1996.** 153-162.

Huang, Z. Q., Lu, J.P., Li, X. H. and Tong, Z.F. Effect of mechanical activation on physico-chemical properties and structure of cassava starch. *Carbohydrate polymers*. **2007.** 68:128-135

Huber, K.C., y BeMiller, J.N. Location of sites of reaction within starch granules. *Cereal Chemistry*. **2001.** 78:173-180.

Jacobs, H., Eerlingen,R.C.,Clauwaert,W.,&Delcour,J.A.Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources. *Cereal Chemistry*. **1995**.72, 480–487.

Jane, J. Current understanding on starch granule structures. *The Japanese Society of Applied Glycoscience*. **2006**.. 205-213

Jayakody, L., Hoover, R., Liu, Q., & Donner, E. Studies on tuber starches III.Impact of annealing on the molecular structure,composition and physicochemical properties of yam(*Dioscorea* sp.) starches grown in Sri Lanka.*Carbohydrate Polymers*. **2009**. 76, 145–153.

Jiangping Yea, Xiuting Hua, Shunjing Luoa, Wei Liua, Jun Chena, Zhiru Zenga, Chengmei Liua. Properties of starch after extrusion: A review. *State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University*.**2017**. 10-11.

Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. Edible and biodegradable starch films: a review. *Food and Bioprocess Technology*. **2012**. 5(6), 2058-2076.

Jobling, S. Improved starch for food and industrial applications, *Curr. Opin Plant Bio*. **2004**.7, 210-218

Ju, J., and Mittal, G.S. Physical properties of various starch based fat-substitutes. Ontario, Canada, NIG. **1995**. 361-362.

Juszczak, L. Surface of triticale starch granules. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Food Science and Technology*. **2003**. 6.

Karim, A.A., Norziah, M.H., and Seow, C.C. Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*. **2000**. 71,9-36.

Kaur, L. Singh, J. and McCarthy, O.J. and Singh, H. Physico-chemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *Journal of Food Engineering*. **2007**.82:383-394.

Leach, M.W.Gelatinization of starch. *Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press, New York and London .**1965**; vol 1: 289

Li, J. Y. and Yeh, A. I. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power of various starches, *Journal of Food Engineering*. **2001**. 50, 141-148.

Lim, S.T., and Seib, P.A. Location of phosphate esters in a wheat starch phosphate by ³¹P-nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Cereal Chemistry*. **1993**. 70:145-152.

Lima, M., & Sastry, S.K. The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *Journal of Food Engineering*. **1999**. 41, 115–119.

Linden, G. and D. Lorient. *New Ingredients in Food Processing: Biochemistry and Agriculture*. CRC Press, Boca Raton. **1999**.

Lindeboom N., Chang P.R., y Tyler R.T. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. **2004**. *Starch/Stärke*: 56(3-4), 89-99.

Lineback, D.R. The starch granule. Organization and properties. *Baker Digest*, March, **1984**. 16-21.

Liu, Y., Chen, J., Luo, S., Li, C., Ye, J., Liu, C., Gilbert, R. G. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology. *Carbohydr. Polym.* **2017**, 175, 265-272.

López, O. V., Zaritzky, N. E., & García, M. A. Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of Food Engineering*. **2010**. 100(1), 160-168

Maache-Rezzoug, Z., Zarguili, I., Loisel, C., Queveau, D., & Buléon. A. Structural modifications and thermal transitions of standard maize starch after DIC hydrothermal treatment. *Carbohydrate Polymers*. **2008**. 74, 802–812.

MacGregor, A.W. and Morgan, J.E. Structure of amylopectins isolated from large and small starch granules of normal and waxy barley. *Cereal Chemistry*. **1984**. 61, 222-228.

Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Tongdang, T., & Mesbahi, G. Physicochemical properties of pre-gelatinized wheat starch produced by a twin drum drier. *Journal of Agricultural Science and Technology*. **2011**.13(2), 193-202.

Martínez-Bustos, F., and A. A. El-Dash. Elaboration of instant corn flour by hydrothermal process I. *Arch. Latin. Nutr.* **1993**. 43: 310-315.

Martínez-Bustos, F., López-Soto, M., Zazueta-Morales, J., Morales-Sánchez, E. Preparación y propiedades de almidones pregelatinizados de yuca (*Manihot esculenta crantz*) y jícama (*Pachyrhizus erosus*) usando calentamiento óhmico. *Agrociencia*.**2005**. 278

Marzena W., Artur M., Radoslaw K., Urszula P., Jerzy J. Physicochemical properties of waxy corn starch after three-stage modification. *Food hydrocolloids*.**2016**.182-190.

Mira, I., Persson, K., and Villwock, V. K. On the effect of Surface active agents and their structure on the temperature-induced changes of normal and waxy wheat starch in aqueous suspension. Part I. Pasting and calorimetric studies. *Carbohydrate polymers*. **2007**. 64:665-678

M. Kapelko, T. Zieba, A. Golachowski, A. Gryszkin. Effect of the production method on the properties of RS3/RS4 type resistant starch. Part 1: Properties of retrograded starch (RS3) produced under various conditions and its susceptibility to acetylation. *Food Chemistry*. **2012**. 1494-1504

Morales, S., Figueroa, J., Gaytan, M. Wet Method for measuring starch gelatinization temperature using electrical conductivity. *Food engineering and physical properties*. Institute of Food Technologists. *Journal of food science*. **2009**. 382

Morris, M. J. Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science and Technology*. **1990**. 1,2-6

Mua, J. and Jackson D. S. Fine structure of corn amylose and amylopectin fractions with various molecular weights. *J. Agric. Food Chem.* **1997**. 45:3840-3847

Murúa-Pagola, M., Beristain-Guevara, C. I., & Martínez-Bustos, F. Preparation of starch derivatives using reactive extrusion and evaluation of modified starches as shell materials for encapsulation of flavoring agents by spray drying. *Journal of Food Engineering*. **2009**. 91, 380-386.

Narváez-González, E. D., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Taba, S., Tostado, E. C., Peniche, R. Á. M., & Sánchez, F. R. Relationships between the microstructure, physical features, and chemical composition of different maize accessions from Latin America. *Cereal Chem Journal*. **2006**. 83(6), 595-604.

Neimo, L. Papermaking Chemistry. Fapet Oy: Helsinki, Finland. **1999**. 329

Ney, K.H. Sensogramme, eine methodische Erweiterung der Aromagramme. *Gordian* **1988**. 88(1): 19.

Nurhadi B., Roos Y.H., Maidannyk V. Physical properties of maltodextrin DE 10: Water sorption, water plasticization and enthalpy relaxation. *Journal of Food Engineering*, **2016**. 174, 68-74.

Nuwamanya, E., Baguma, Y., Wembabazi, E., & Rubaihayo, P. A comparative study of the physicochemical properties of starches from root, tuber and cereal crops. *African Journal of Biotechnology*. **2013**. 10(56), 12018-12030

Padial J. ¿Qué es el almidón modificado? [Monografía de internet] Curiosoando. 2005 [Consultado el 18 de marzo de 2017] Disponible en : www.curiosoando.com/almidon-modificado

Palaniappan, S. & Sastry, S. K. Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*. **1991**. 14, 221-236.

Paredes- López, O., Guevara Lara, F., & Bello Pérez, L. A. La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias*, **2010**. 92(92)

Patel, B. K., and Seetharaman K. Effect of heating rate on starch granule morphology and size. *Carbohydrate Polymers*. **2006**. 65, 381-385

Prieto J., Rubio C., Román A., Méndez M., González C., Prieto F. Degradación física del almidón de cebada (*Hordeum sativum* Jess). Correlación entre gelatinización y el tamaño de gránulos. Multiciencias, **2009** .115-125

Ratnayake, W.S., and Jackson, D. S. Gelatinization and Solubility of Corn Starch during Heating in Excess Water: New Insights. J. Agric. Food Chem. **2006**. 3712-3716

Rindlav-Westling, A., Standing, M., Gatenholm, P. Crystallinity and Morphology in Films of starch, amylose and amylopectin blends. Biomacromolecules. **2002**. 3, 84-91

Rivas González, M. Almidón acetilado de plátano: caracterización fisicoquímica y molecular. Programa de posgrado en alimentos del centro de la república (PROPAC). Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencia de los Alimentos. Universidad Autónoma de Querétaro. **2012**.

Roos, Y.H. Phase Transition in Foods. **1995**. Academic Press, California.

Rutenberg, M.W. and Solarek, D. Starch derivatives: Production and uses. Starch: Chemistry and Technology. New York: Academic Press. **1984**. 314-388

Sadeghi A., Shahidi F., Mortazavi S.A., Mahaladi M.N. Evaluation of different parameters effect on maltodextrin production by α -amylase Termamyl 2-x. World Applied Sciences Journal, **2008**. 3(1), 34-39.

Sánchez, I. Propiedades fisicoquímicas de almidones catiónicos elaborados por extrusión. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. **2007**.

Sakr, M., and S. Liu. 2014. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). Renewable and Sustainable Energy Reviews 39:262-269

Sarker, M. Z. I., Elgadir, M. A., Ferdosh, S., Akanda, M. J. H., Aditiawati, P., & Noda, T. Rheological behavior of starch-based biopolymer mixtures in selected processed foods. Starch/Staerke. **2013**. 65(1-2), 73-81.

Sasson, A. & Monselise, S. P. Electrical conductivity of 'Shamouti' orange peel during fruit growth and postharvest senescence. *Journal of the American Society of Horticultural Science*. **1977**. 102, 142-144.

Saunders J., Levin D. B., and Izydorczyk M. Limitations and challenges for wheat-based bioethanol production. InTech. Retrieved from. **2011**

Schirmer, M., Jekle, M., & Becker, T. Starch gelatinization and its complexity for analysis. *Starch/Staerke*. **2015** .67(1-2), 30-41.

Seib, P.A., and Stearns, M. Extrusion processing of wheat starch. *Cereal Sci*. **1972**.17:102

Serrano, P. O., & Franco, C. M. L. Modificac,ão hidrotérmica (annealing) e hidrólise enzimática do amido de mandioca. *Brazilian Journal of Food and Technology*. **2005**. 8, 220–232.

Singh, N. Singh, J. Kaur, L. Singh, N. Sodhi and Singh-Gill B. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources, *Food Chem*. **2003**.81, 219-231

Singh, J., Kaur, L., McCarthy, O.J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications. *Food hydrocolloids*. **2007**. 21, 1-22.

Slaughter S.L., Ellis P.R., y Butterworth P.J. An investigation on the action of porcine Pancreatic α -amylase on native and gelatinized starches. *Bioch et Biophy. Acta*. **2001**. 1525: 29-36.

Solarek, D.B. Phosphorylated starches and miscellaneous inorganic esters. *Modified Starches: Properties and uses*. Boca Raton, FL: CRC Press. **1986**. 97-122.

Stute, R. Hydrothermal modification of starches: the difference between annealing and heat/moisture-treatment. **1992** .205-214.

Sun, S., Zhang, G., Ma, C. Preparation, physicochemical characterization and application of acetylated lotus rhizome starches. **2016**. 135, 10-17.

Sweedman, M. C., Tizzotti, M. J., Schäfer, C., & Gilbert, R. G. Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches: a review. *Carbohydrate Polymers*. **2013**. 92(1)

Tester, R.F., and Debon, S. Annealing of starch- a review. *International Journal of biological macromolecules*. **2000**. 1-12.

Tester, R. F. and Karkalas. J. Starch composition, fine structure and architecture. *Journal of cereal science*. **2004**. 39:151-165

Thiebaud, S., Aburto, J., Alric, I., Borredon, E., Bikiaris, D., Prinos, J., et al. Properties of fatty-acid esters of starch and their blends with LDPE. *Journal of Applied Polymer Science*. **1997**. 64, 705e721.

Thomas D. J., and Atwell W. A. Starches. Critical guides for the food industry. Eagan Press Handbook series. St. Paul, Minnesota, USA. **1999**. pp 1-29.

Trubiano, P.C Succinate and substituted succinate derivatives of starch. *Modified Starches: Properties and uses*. Boca Raton, FL: CRC Press. **1986**. 131-148.

Valenzuela C. & Aguilera J. M. Effects of maltodextrin on hygroscopicity and crispness of apple leathers. *Journal of Food Engineering*, **2015**. 144, 1-9.

Vermeylen,R. Derycke, V. Delcour, J.A., Goderis, B. Reynaers,H., and Koch, M. H.J. Structural Transformations during gelatinization of starches in limited water: Combined wide-and small-angle X-ray scattering study. *Biomacromolecules*. **2006a** 7, 1231-1238.

Vermeylen,R. Derycke, V. Delcour, J.A., Goderis, B. Reynaers,H., and Koch, M. H.J. Structural Transformations during gelatinization of starches in limited water: Combined wide-and small-angle X-ray scattering study. *Biomacromolecules*. **2006b** .7, 2624-2630.

Villamiel, M. El calentamiento óhmico para la conservación de alimentos. [Monografía en internet]. Instituto de fermentaciones industriales: Consejo superior

de investigaciones científicas. 2006. [Consultado el 8 de diciembre de 2016].
Disponible en: www.consumer.es

Walpole, E., Myers, H. y Myers, L. Probabilidad y estadística para ingenieros. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, México. **1999**

Wang, W.-C. & Sastry, S. K. Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating: electrical conductivity profiles and vacuum infusion studies. Journal of Food Engineering. **1993**. 20,299-309.

Wang, W.-C. & Sastry, S. K. Starch Gelatinization in Ohmic Heating. Journal of Food Engineering. **1997**. 227.

Wang L., and Weller C.L. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. Trends in Food Science & Technology, **2006**.17(6), 300-312.

Ward R and Mudford E. Use of pasting temperature as an estimate for gelatinisation temperature in rice. Biometric Consulting Report CR313. NSW Department of Primary Industries, NSW, Australia. **2008**

Waterschoot, J., Gomand, S. V., Fierens, E., & Delcour, J. A. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches. Starch/Staerke. **2015**. 67(1-2), 14-29.

Watson, S. A. Determination of starch gelatinization temperature. In Methods in Carbohydrate Chemistry, Vol. IV, ed. R. L. Whistler. Academic Press, New York. **1964**. pp. 240-242.

Whistler, R. L., and BeMiller, J. N. Carbohydrate chemistry for food scientist. Eagan press, st. Paul, Minnesota, USA. **1999**. pp 63-151

Wongsagonsup, R., Varavinit, S., & BeMiller, J.N. Increasing slowly digestible starch content of normal and waxy maize starches and properties of starch products. Cereal Chemistry. **2008**. 85, 738–745.

W.Cui, Starch Modification and Applications. Food Carbohydrates. Chemistry, Physical properties and applications. **2005** Chapter 8.

Wu, Y., Chen, Z., Li, X., & Wang, Z. Retrogradation properties of high amylose rice flour and rice starch by physical modification. *LWT - Food Science and Technology (Campinas.)*. **2010**. 43(3), 492-497.

Wurzburg, O.B. *Modified Starches: Properties and Uses*. CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida U.S.A. **1986**. pp 3-16.

Xie, F. Yu, L., H., and Chen, Starch modification using reactive extrusion. **2006**.131-139

Yadav, B. S., Guleria, P., & Yadav, R. B. Hydrothermal modification of Indian water chestnut starch: Influence of heat-moisture treatment and annealing on the physicochemical, gelatinization and pasting characteristics. *LWT - Food Science and Technology (Campinas.)*.**2013**. 53(1), 211-217

Yasunaga, T., Bushuk, W. & Irvine, G. N. Gelatinization of starch during bread-baking. *Cereal Chemistry*.**1968**. 45, 269-279.

Yueming, H., Lijuan, W., Hong, Z., Zaigui, L. Modification of physicochemical properties and in vitro digestibility of wheat flour through superheated steam processing. *Journal of cereal science* 74. **2017**. 231-237.

Yusraini E., Hariyadi P. & Kusnandar F. Preparation and partial characterization of low dextrose equivalent (DE) maltodextrin from banana starch produced by enzymatic hydrolysis. *Starch/Stärke*, **2013**. 65, 312-321.

Zaidul, I.S.M., Uthumporn, U., Karim , A.A. Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using mixture of amyolytic enzymes.Elsevier. *Food and bioproducts processing*. **2009**. 47-54

Zazueta-Morales, J.J., Martínez, B.F., Jacobo, V.N., Odorica, F.C., & Paredes, L.O. Effects of calcium hydroxide and screw speed on physicochemical characteristics of extruded blue maize. *Journal of Food Science*. **2002**. 67, 3350–3358.

Zhang, L. L., Deng, X. M., Zhao, S. J., & Huang, Z. T. Biodegradable polymer blends of poly (3-hydroxybutyrate) and starch acetate. *Polymer International*, .1997.44, 104e110.

Zhang, L.M. A review of starches and their derivatives for oilfield application in china. 2001. 401-407