

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**



**Obtención, purificación y caracterización de almidón de raíz de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK) y sus potenciales aplicaciones**

**POR**

**CÉSAR YAIR AMADOR LLANAS**

**T E S I S**

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

**Marzo de 2018**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"  
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Obtención, purificación y caracterización de almidón de raíz de calabacilla loca  
(*Cucurbita foetidissima* HBK) y sus potenciales aplicaciones**

**TESIS**

Presentada por

**CÉSAR YAIR AMADOR LLANAS**

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para  
obtener el título profesional de

**INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**APROBADA**



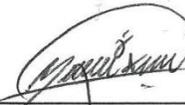
M.P. Francisco Hernández Centeno  
**Presidente**



Dra. María Hernández González  
**Vocal**



M.C. Haydee Yajaira López De la Peña  
**Vocal**



Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos  
**Vocal**

  
Dr. José Dueñez Alanís  
**Coordinador de la División de Ciencia Animal**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo de 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"  
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

**Obtención, purificación y caracterización de almidón de raíz de calabacilla loca  
(*Cucurbita foetidissima* HBK) y sus potenciales aplicaciones**

**T E S I S**

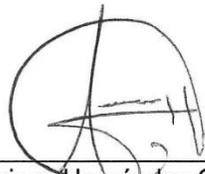
Presentada por

**CÉSAR YAIR AMADOR LLANAS**

como requisito parcial para obtener el título profesional de

**INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

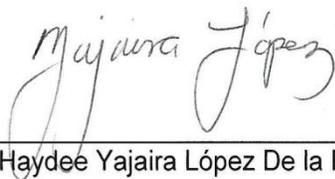
Fue dirigida por el siguiente comité:



M.P. Francisco Hernández Centeno  
**Asesor principal Interno**



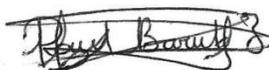
Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos  
**Asesor principal externo**



M.C. Haydee Yajaira López De la Peña  
**Co-asesor**



Dra. María Hernández González  
**Co-asesor**



Dr. Paul Baruk Zamudio Flores  
**Co-asesor Externo**

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo de 2018

## DEDICATORIAS

A Dios por nunca soltarme de la mano y por mostrarme su grandeza en cada prueba de su amor, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a él.

A mis padres, Juan Jesús Amador Mendoza y Norma Leticia Llanas Méndez, porque su ejemplo de superación ha sido un pilar muy importante a lo largo de toda mi vida, que sin su amor y apoyo no podría concluir mis metas, es por ello que quiero que sientan que este logro es de ustedes.

A mis hermanos Juan, Oscar y Lizbeth, que siempre me apoyaron y me alentaron a concluir este ciclo, que con sus consejos y cariño me impulsan a ser una mejor persona.

A toda mi familia que siempre confió en mí y me apoyaron siempre al momento de sentir impotencia ante las dificultades que se presentaron.

A mi novia Aracely por siempre alentarme a dar lo mejor y por creer en mí en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme el don de la vida, por guiarme por el buen camino y por darme la bendición de concluir mis metas sin importar las adversidades y por demostrarme su amor en cada una de sus gracias.

A mis padres que con tanto sacrificio me sacaron adelante para poder concluir cada uno de los ciclos en la vida. Que con su trabajo y esfuerzo me demuestran cada día el amor incondicional y por darme los ejemplos y valores necesarios para salir adelante. Hoy y siempre les agradezco con todo amor y admiración por ser un ejemplo a seguir.

A mis hermanos que siempre han estado conmigo a pesar de las diferencias que tenemos, les agradezco por el amor con el que me apoyan siempre.

A mis maestros que en el transcurso de mi formación me han apoyado directa e indirectamente para poder cumplir mi sueño de culminar mi carrera profesional.

En especial a mi asesor M.P. Francisco Hernández Centeno, por darme la oportunidad y la confianza de realizar este trabajo y por todo su apoyo otorgado, por demostrarme su amistad, compañerismo y una gran paciencia y por aportar una gran parte de su tiempo para concluir esta etapa ya que sin su ayuda no sería posible la realización de este documento.

Al Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos, por su valiosa colaboración en la realización de los análisis instrumentales de caracterización.

Al Dr. Paul Baruk Zamudio Flores del Laboratorio de Carbohidratos, Empaques y Alimentos Funcionales (CEAF) del CIAD, A.C. – Unidad Cuauhtémoc, por su valiosa colaboración para el uso de los equipos de análisis a su cargo.

Al Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por su colaboración para el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM).

A mi novia Aracely, por ser una gran amiga y estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos y por escuchar con cariño mis pláticas. Por darme seguridad creyendo en mí en todo momento y por impulsarme a mejorar.

A mis compañeros con los que he compartido muchos momentos desde el inicio, que con risas, enojos y tristezas siempre hemos salido adelante. Y por su ayuda que otorgaron a este proyecto.

## CONTENIDO

DEDICATORIAS .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
INDICE DE FIGURAS .....	ix
INDICE DE TABLAS .....	x
RESÚMEN .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. JUSTIFICACIÓN .....	13
III. HIPÓTESIS .....	14
IV. OBJETIVOS .....	15
4.1. General .....	15
4.2. Específicos .....	15
V. REVISIÓN DE LITERATURA .....	16
5.1. Almidón .....	16
5.1.1. Definición .....	16
5.1.2. Generalidades del almidón .....	16
5.1.2.1. Forma del gránulo de almidón .....	17
5.1.2.2. Estructura y función .....	18
5.1.2.3. Amilosa .....	20
5.1.2.4. Amilopectina .....	20
5.1.3. Fuentes convencionales de almidón .....	21
5.1.3.1. Cereales .....	21
5.1.3.2. Tubérculos .....	23
5.1.4. Fuentes no convencionales de almidón .....	23
5.1.4.1. Frutos .....	24
5.1.4.2. Tubérculos y raíces .....	25

5.2.	Propiedades físico-químicas.....	26
5.3.	Usos en la industria manufacturera .....	28
5.4.	Usos en la industria de alimentos .....	28
5.5.	Calabacilla loca ( <i>Cucurbita foetidissima</i> HBK).....	29
5.5.1.	Generalidades .....	29
5.5.2.	Composición química .....	30
VI.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
6.1.	Obtención del almidón.....	31
6.1.1.	Tratamiento de las raíces.....	32
6.1.2.	Molienda de las raíces.....	32
6.1.3.	Filtrado .....	32
6.1.4.	Secado y pulverizado .....	33
6.2.	Purificación del almidón.....	33
6.2.1.	Lavado .....	33
6.2.2.	Secado.....	33
6.2.3.	Desgrasado .....	33
6.3.	Análisis proximal.....	34
6.3.1.	Humedad .....	34
6.3.2.	Proteína .....	34
6.3.3.	Extracto etéreo.....	35
6.3.4.	Fibra cruda total.....	35
6.3.5.	Cenizas totales.....	36
6.3.6.	Pureza.....	37
6.3.7.	Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	37
6.3.8.	Calorimetría diferencia de barrido (DSC) .....	38
6.3.9.	Propiedades reológicas .....	38

6.3.9.1. Propiedades de flujo .....	38
6.3.10. Propiedades viscoelásticas.....	39
6.3.11. Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	40
<b>VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>41</b>
7.1. Purificación del almidón.....	41
7.2. Análisis del almidón.....	41
7.2.1. Análisis proximal.....	41
7.2.2. Pureza.....	43
7.2.3. Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) .....	44
7.2.4. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	45
7.2.5. Propiedades reológicas .....	48
7.2.5.1. Propiedades de flujo .....	48
7.2.6. Microscopía óptica y SEM .....	54
7.3. Posibles aplicaciones .....	56
<b>VIII. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>57</b>
<b>IX. Referencias bibliográficas .....</b>	<b>59</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Almidón y gránulos de almidón de trigo vistos al microscopio electrónico.....	17
<b>Figura 2.</b> Gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas: papa, maíz y chícharo observados bajo el microscopio electrónico.....	18
<b>Figura 3.</b> a y d: Representación esquemática de un corte transversal de un gránulo de almidón. Se observan las regiones semicristalinas y los anillos de crecimiento amorfos alternante; b: Magnificación a la región semicristalina y anillos de crecimiento amorfos; c: Amplificación a la región semicristalina. Formada principalmente por amilopectina (altamente ramificada) y algo de amilosa; e: Arreglo helicoidal entre dos cadenas de glucosa vecinas de la amilopectina.....	19
<b>Figura 4.</b> Estructura química de la amilosa.....	20
<b>Figura 5.</b> Estructura química de la amilpectina.....	21
<b>Figura 6.</b> Planta y raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK).....	30
<b>Figura 7.</b> Espectro de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) correspondiente al almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK).....	45
<b>Figura 8.</b> Gráfico de propiedades térmicas (DSC) del almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK).....	46
<b>Figura 9.</b> Variación de la viscosidad (a) y esfuerzo de corte (b) con la velocidad de corte de dispersiones de almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) (5% p/p) a 50, 60 y 70 °C.....	50
<b>Figura 10.</b> Comportamiento del módulo de elástico ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) de pastas de almidón raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) al 20% (p/p) durante la etapa de calentamiento (a) y enfriamiento (b). Esfuerzo de deformación = 1%. Frecuencia = 1 Hz.....	52
<b>Figura 11.</b> Dependencia a la frecuencia del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) de dispersiones de almidón raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) al 20% (p/p) a 25 (a) y 90 °C (b). Esfuerzo de deformación =1%.....	53

<b>Figura 12.</b> Micrografía del almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) a 100X y 400X.....	55
<b>Figura 13.</b> Micrografías de gránulos de almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) bajo el microscopio electrónico, observada a 1000X y 3000X.....	55

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Contenido de almidón y su composición en importantes fuentes .....	277
<b>Tabla 2.</b> Composición química del almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK).....	41
<b>Tabla 3.</b> Propiedades térmicas de almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C.foetidissima</i> HBK) .....	45
<b>Tabla 4.</b> Variables reológicas del modelo de la Ley de Potencia ( $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ ) para almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) (5 % p/p) a 25, 50 y 70 °C. ....	49
<b>Tabla 5.</b> Propiedades viscoelásticas de almidón de raíz de calabacilla loca ( <i>C. foetidissima</i> HBK) (5 %, p/p) durante la etapa de calentamiento y enfriamiento.....	51

## RESUMEN

El almidón es el segundo polisacárido en abundancia, sólo después de la celulosa, su función principal es constituir un reservorio de energía. Se encuentra distribuido en diferentes partes de las plantas. Es de gran importancia tecnológica por sus propiedades funcionales como espesante, estabilizante, adhesivo, gelificante, entre muchas otras, las cuales están en función de la fuente botánica, por lo que este estudio se enfocó en la obtención, purificación y caracterización de una fuente no convencional, la raíz de la calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK), con el objetivo de explorar esta fuente en busca de similares o mejores propiedades funcionales que complementen las aplicaciones tecnológicas de este polisacárido, el cual proviene casi exclusivamente de los cereales y algunos tubérculos. El experimento comprendió la obtención del material biológico, la extracción y purificación del almidón, composición proximal, determinación de propiedades a través de FTIR, DSC, perfil reológico, y caracterización morfológica. Se obtuvo almidón con una pureza mayor a 93 %, con perfil bromatológico semejante al de algunos almidones. El FTIR mostró la estructura química de este almidón; se encontró que posee una temperatura y entalpía de gelificación semejante a algunos almidones comunes, como el de maíz y papa, y el perfil reológico indicó presencia de comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico, con viscosidad baja a temperaturas altas, pero con poder de hinchamiento mayor que el reportado en almidón de otros tubérculos, como la papa. Las micrografías mostraron gránulos de almidón de morfología mixta, con un tamaño promedio menor a 20  $\mu\text{m}$ . Las propiedades elucidadas para este almidón lo hacen candidato para alimentos procesados a no muy altas temperaturas, y podría ser una materia prima para la elaboración de películas biodegradables con potenciales aplicaciones futuras.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro de las necesidades básicas de cualquier ser vivo, una de las vitales es la alimentación, necesaria para la administración de nutrientes y energía para el desarrollo de todas las funciones celulares y, por lo tanto, de todo el organismo en su conjunto.

La obtención de energía puede lograrse a partir del metabolismo de varias biomoléculas; sin embargo, los principales aportes de energía suelen provenir de los carbohidratos, entre los cuales los almidones una importante función por ser reserva y fuente de energía de liberación prolongada, a diferencia de los azúcares simples.

El presente trabajo muestra un estudio enfocado a la obtención y caracterización de almidón a partir de una fuente no convencional: la raíz tuberosa de la calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK), un recurso forestal no maderable oriundo de las zonas semiáridas del desierto chihuahuense y otras regiones mexicanas, el cual crece de forma silvestre y es considerado como planta arvense en los cultivos comerciales.

Al no ser exigente en aspectos agronómicos, dicha planta cumple un perfil prometedor en cuanto a convertirse en una oportunidad sustentable para ayudar a satisfacer la demanda de almidón en la industria en general, por lo que se ha extraído, purificado y evaluado sus propiedades a través de las metodologías que en el contenido se describen y que, de no ser incluido en sistemas de procesamiento de alimentos, bien puede ser útil en aplicaciones donde los almidones comerciales actualmente se utilizan.

## II. JUSTIFICACIÓN

Las principales fuentes de almidones para la alimentación y otras aplicaciones industriales son los cereales como el maíz, el trigo y el arroz, y algunos tubérculos como la papa y la yuca. Los productos de estos cultivos son cada vez más demandados debido a que la población crece constantemente, además de que en épocas recientes se ha desarrollado su uso en la producción de biocombustibles, plásticos de biodegradabilidad acelerada, entre otros productos no alimenticios, alejando a las cosechas de cereales y tubérculos comerciales de su principal destino: la alimentación.

Para paliar esta problemática, se han desarrollado esfuerzos de investigación encaminados a la búsqueda de nuevas y variadas fuentes de almidones que permitan satisfacer esa demanda cada vez más amplia y creciente, debido a las diversas aplicaciones que se van descubriendo también con el tiempo.

Son variadas las fuentes de almidón que se han ido descubriendo en los últimos años, conocidas ahora como fuentes no convencionales, y entre las que se encuentran diferentes frutos, como el plátano, la manzana, el mango, entre otros; también algunos cereales no utilizados anteriormente como fuente de almidón como la avena, y raíces tuberosas como la jícama.

Se espera, con estos esfuerzos, desarrollar nuevas y sustentables fuentes de almidón para ir sustituyendo, o bien, complementando la creciente demanda de este polisacárido, lo que permitirá desarrollar plenamente las potencialidades y posibles nuevas aplicaciones del mismo, ya sea para la alimentación o con otros propósitos. Es el caso del presente trabajo enfocado en las raíces de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK), un recurso no utilizado de las regiones semiáridas del país.

### III. HIPÓTESIS

**H<sub>1</sub>:** Es posible obtener almidón con propiedades útiles para la industria alimenticia y/o no alimenticia a partir de las raíces tuberosas de la calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK)

**H<sub>0</sub>:** No es posible obtener almidón con características útiles a partir de las raíces tuberosas de la calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK).

## **IV. OBJETIVOS**

A fin de demostrar la hipótesis planteada, este proyecto se centró en el alcance de los siguientes objetivos:

### **4.1. General**

Obtener y caracterizar almidón a partir de la raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) para su uso como materia prima.

### **4.2. Específicos**

- 4.2.1. Obtener el material biológico necesario para la extracción.
- 4.2.2. Obtener almidón a partir de las raíces tuberosas de la calabacilla loca.
- 4.2.3. Purificar el almidón obtenido.
- 4.2.4. Caracterizar el material a través de análisis químicos y físicos.
- 4.2.5. Determinar las potenciales aplicaciones del material obtenido.

## **V. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **5.1. Almidón**

#### **5.1.1. Definición**

El almidón es la principal fuente de carbohidratos en la dieta humana; por sus propiedades fisicoquímicas y funcionales se ha usado en diferentes industrias como la de alimentos, farmacéutica, petrolera y textil. El almidón es el principal polisacárido de reserva de las plantas. Está formado por una fracción lineal (amilosa) y por una ramificada (amilopectina), ambas compuestas por moléculas de D-glucosa. El almidón se encuentra en una gran variedad de tejidos, incluyendo hojas, tubérculos, frutas y semillas (Manrique *et al.* 2007).

El almidón es una fracción importante en numerosos productos agrícolas como cereales, leguminosas, tubérculos, y algunas frutas como el plátano y el mango, que en estado verde o inmaduro alcanzan concentraciones importantes de este polisacárido (Manrique *et al.* 2007).

#### **5.1.2. Generalidades del almidón**

El almidón es el principal carbohidrato de almacenamiento en las plantas y uno de las importantes materias primas vegetales tanto para aplicaciones alimentarias como industriales. Aproximadamente el 70% de la producción europea y estadounidense de almidón se utiliza para fines industriales, mientras que alrededor del 30% se utiliza como almidón para el consumo humano y animal directo. La gama de almidón

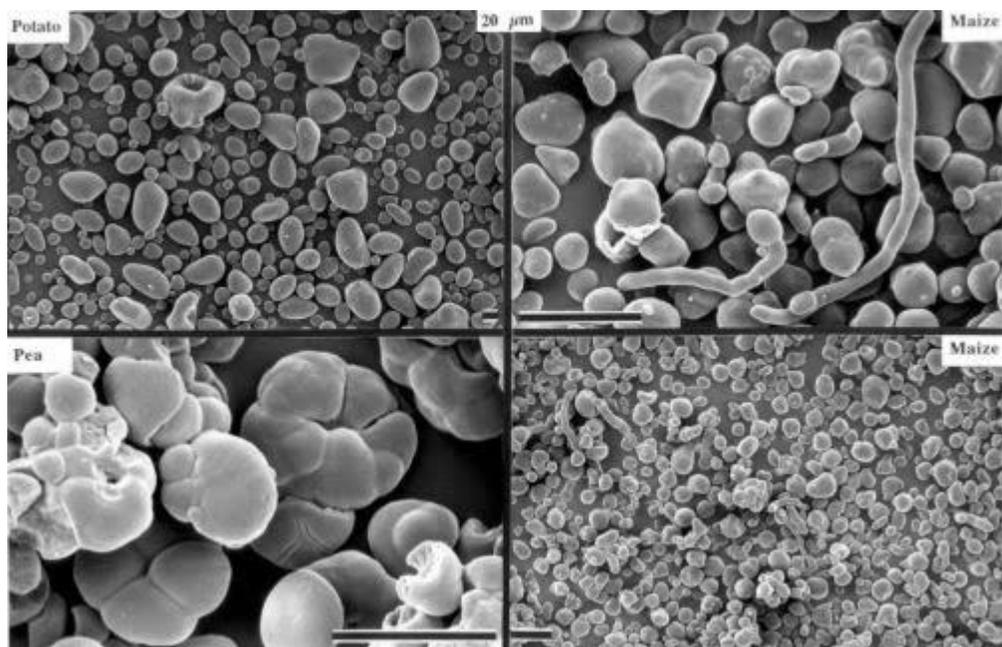
aplicaciones está fuertemente influenciado por la relación de sus dos componentes principales, amilosa esencialmente lineal y amilopectina ramificada, la longitud y la distribución de las cadenas de ramificación y los niveles de fosfato, y componentes como lípidos y proteínas. La relación de amilosa/amilopectina tiene la mayor influencia en las propiedades fisicoquímicas del almidón, y para muchas aplicaciones es deseable tener un material enriquecido de amilopectina o amilosa. La mayoría de los almidones contienen 20-30 % de amilosa y 70-80 % de amilopectina (Schwall, *et al.* 2000).

#### 5.1.2.1. Forma del gránulo de almidón

El almidón existe en entidades discretas, semicristalinas las cuales reciben el nombre de gránulos (Fig. 1). El tamaño, la forma y la estructura de los gránulos difieren substancialmente entre fuentes botánicas, los diámetros varían en un rango de 1  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ ; las formas pueden ser elípticas, esféricas, angulares; simples o compuestos (Fig. 2). Existe amplia diversidad en la estructura y las características del granulo de almidón nativo, incluyendo variación significativa entre gránulos de una misma especie. El almidón está compuesto por dos biopolímeros, diferentes en su estructura: amilosa y amilopectina (Sandoval, *et al.* 2005).



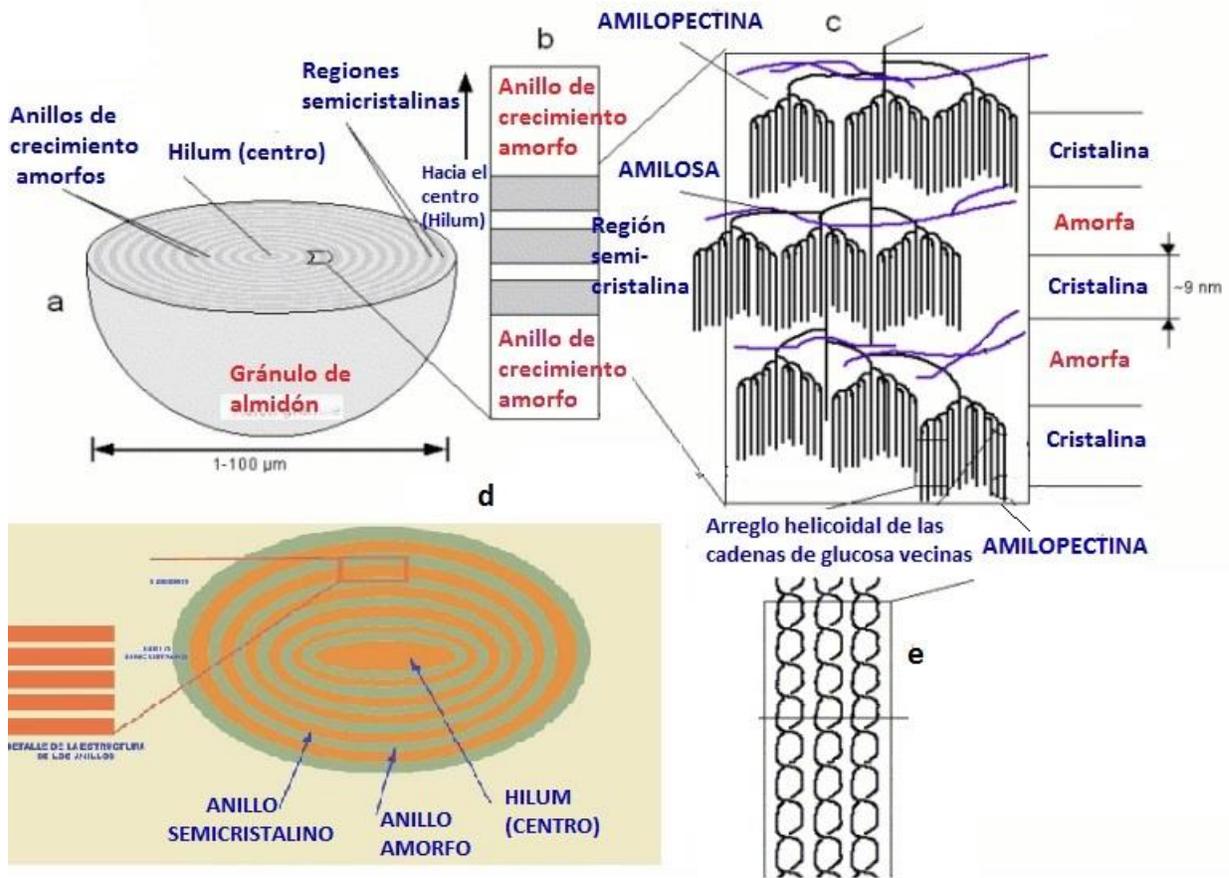
**Figura 1.** Almidón y gránulos de almidón de trigo vistos al microscopio electrónico (Brunel, 2016).



**Figura 2.** Gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas: papa, maíz y chícharo observados bajo el microscopio electrónico (Castro-Pacheco, 2010).

### 5.1.2.2. Estructura y función

Los gránulos de almidón están formados por anillos concéntricos de almidón formados alrededor de un núcleo llamado "*hilum*" en el que alternan películas semicristalinas y amorfas. La región semicristalina es más abundante en amilopectina y es más impermeable al ataque enzimático debido a su resistencia a la entrada de agua (Medina y Salas, 2008). La región amorfa es rica en amilosa y tiene menor densidad que el área cristalina, lo que facilita el flujo de agua y el ataque enzimático; sin embargo, es abundante en enlaces de hidrógeno (Tovar, 2008). En las regiones cristalinas, el almidón posee una estructura tridimensional ordenada (resultado del arreglo helicoidal entre las cadenas de glucosa vecinas de la amilopectina); mientras que en las zonas amorfas el almidón posee una estructura más desordenada (Fig. 3) (Velíšek, 2014).



**Figura 3.** a y d: Representación esquemática de un corte transversal de un gránulo de almidón. Se observan las regiones semicristalinas y los anillos de crecimiento amorfos alternante; b: Magnificación a la región semicristalina y anillos de crecimiento amorfos; c: Amplificación a la región semicristalina. Formada principalmente por amilopectina (altamente ramificada) y algo de amilosa; e: Arreglo helicoidal entre dos cadenas de glucosa vecinas de la amilopectina. Esta organización de las cadenas forma las zonas cristalinas dentro del gránulo (Araneda, 2015).

En las regiones semicristalinas se encuentran secciones amorfas que corresponden a los puntos de ramificación de la amilopectina, las cuales pueden contener moléculas de amilosa. Además, se pueden observar bajo el microscopio regiones amorfas aún más grandes, correspondientes a los anillos de crecimiento amorfos (fig. 2). El origen de estos anillos de crecimiento no está del todo claro, aunque se ha demostrado que pueden provenir de las fluctuaciones durante el crecimiento del gránulo de almidón. Por ejemplo, se ha demostrado que cuando las plantas de trigo y cebada se cultivan bajo

condiciones ambientales constantes, sus gránulos de almidón no muestran anillos de crecimiento (Donald, 2004).

Los gránulos también contienen pequeñas cantidades de lípidos (grasas) y proteínas. Estas últimas se encuentran principalmente en la capa superficial de los gránulos, y su contenido varía entre las distintas especies de plantas (Velíšek, 2014).

### 5.1.2.3. Amilosa

La amilosa es un polímero esencialmente lineal compuesto enteramente por enlaces  $\alpha$ -1-4 D-glucopiranososa (Fig. 4), aunque se presentan algunas ramificaciones en este polímero. La amilosa se representa como una estructura de cadenas rectas aunque usualmente existe en forma de hélice, lo cual le permite formar complejos con ácidos grasos libres, mono y diglicéridos, alcoholes lineales y yodo (Sandoval *et al.* 2005).

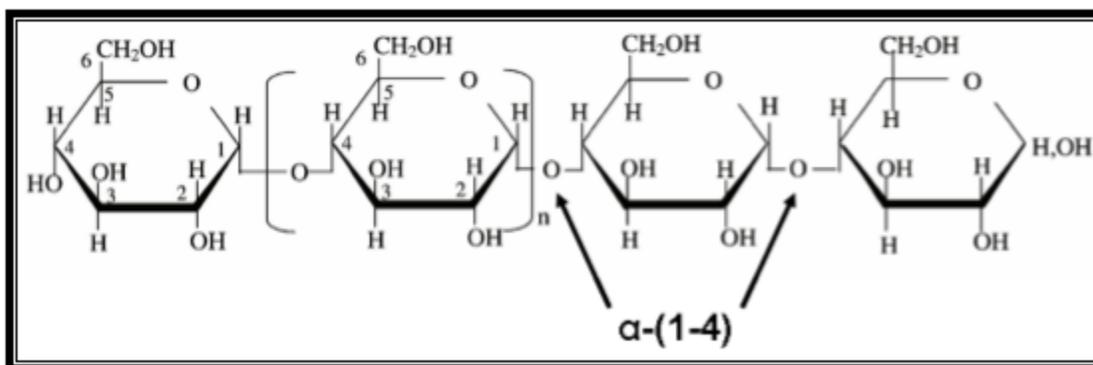


Figura 4. Estructura química de la amilosa (Tovar, 2008)

### 5.1.2.4. Amilopectina

La amilopectina (Fig. 5), es el componente mayoritario del almidón, está formada por cadenas  $\alpha$ -D-glucosa unidos por enlaces  $\alpha$ -1,4; presenta además enlaces  $\alpha$ -1,6, en

los puntos de ramificación, los cuales representan de 4-5% de los enlaces totales (Díaz Barrera, 2015).

La amilopectina es una molécula predominante en la mayoría de los almidones dependiendo a la fuente (entre 70-80 %), alcanzando en ciertos casos, niveles de hasta 98-99 % en los almidones tipos cerosos, posee porciones cortas y largas lo cual permite un arreglo único que imparte propiedades cristalinas y propicia su acomodo dentro de los gránulos de almidón, las ramificaciones tienen un arreglo helicoidal similar al que presenta la amilosa (Díaz Barrera, 2015).

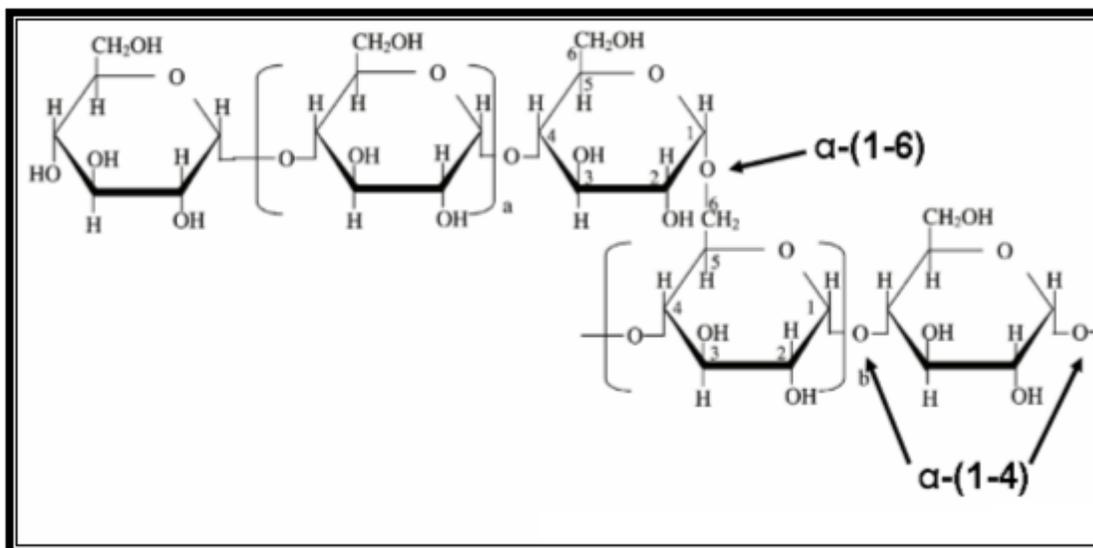


Figura 5. Estructura química de la amilpectina (Tovar, 2008)

### 5.1.3. Fuentes convencionales de almidón

#### 5.1.3.1. Cereales

**Maíz (*Zea mays L.*):** El almidón es el principal componente del grano de maíz y por tanto influye mucho en la funcionalidad como ingrediente en los diferentes usos de la industria alimentaria. El almidón existe como gránulos discretos con diferentes formas, tamaños, y composición, en función del genotipo de maíz. Un factor que afecta la

distribución del tamaño del gránulo de almidón en el endospermo del grano es el ambiente (Tovar, 2008).

**Trigo (*Triticum aestivum* L):** El almidón es el componente principal del grano de trigo (65 – 70%, en base seca), y tiene poco efecto en la calidad de la harina, se encuentra distribuido en el endospermo del grano y su abundancia en el grano de trigo hace que este sea una de las fuentes más abundantes de energía en la dieta humana. Este almidón tiene una distribución bimodal en sus gránulos, cuya dimensión varía de 6.5 a 19.5 micras y por sus propiedades es útil principalmente en aplicaciones alimentarias (Rivera-Andrade, 2017).

**Arroz (*Oryza sativa*):** La producción de arroz a nivel mundial estimada por la FAO para el ciclo 2016 y 2017, fue de 498.5 millones de toneladas, según lo refiere el portal de noticias arroz.com (2016). La harina de arroz se hace con arroces glutinosos y no glutinosos tanto crudos como gelatinizados, y se fabrica mediante aplanado, machacado, molienda mecánica, molienda con piedra, etc. (Juliano, 1994).

Las harinas de arroz ricas en proteína para la alimentación de la primera infancia pueden obtenerse de arroz elaborado cocido mediante un tratamiento desalmidonante con  $\alpha$ -amilasa (Juliano, 1994). Rivera-Andrade (2017) refiere que en la Comunidad Europea se elaboran anualmente unas 8,800 toneladas de arroz quebrado para obtener 7,000 de almidón en cinco o seis fábricas de Alemania, Bélgica, Italia, y los Países Bajos. Este producto se emplea exclusivamente en la alimentación humana, en gran parte para alimentación de bebés y también en tallarines extruidos, esto por las características de su almidón (Loaiza y Larrahondo, 2017).

### **5.1.3.2. Tubérculos**

**Papa (*Solanum tuberosum*):** es el tubérculo más empleado en la obtención de almidón. Pardo, *et al.* (2013) refiere que el contenido de almidón en la papa varía entre 15% y 20% de su peso fresco con un alto contenido de fósforo (0.08%) en comparación con almidones de otras fuentes. Es un factor importante en la elaboración de alimentos siendo materia prima en esta industria por sus características de baja temperatura de gelatinización, baja tendencia a retrogradarse, resistencia a la degradación enzimática, bajo contenido residual de grasas y proteínas (< 0.5% de los gránulos). Adicionalmente, no tiene sabor a cereal y posee una alta viscosidad y capacidad para enlazarse con agua, características que son directamente atribuidas a su estructura.

En textiles, el engomado es el tratamiento de los hilos para darles resistencia, y el apresto es el tratamiento a las telas. Se emplea además en la fabricación de alimentos para bebés, productos de repostería, pasteles, galletas, en la industria farmacéutica para bandas adhesivas, polvo para aplicaciones dermatológicas, para hacer píldoras y tabletas; en la industria de la cerámica; para cerillas, jabones y polvos de lavar; para papel fotográfico, encuadernación, y en la industria manufacturera de papeles y cartones (Rivera-Andrade, 2017).

### **5.1.4. Fuentes no convencionales de almidón**

Debido al constante crecimiento en la demanda de esta materia prima para aplicaciones alimenticias e industriales, se han estado buscando alternativas de obtención dirigidas a complementar a las fuentes más comunes. Dentro de las fuentes exploradas recientemente, se tienen las que se exponen a continuación.

#### 5.1.4.1. Frutos

**Mango (*Mangifera indica*):** El carbohidrato predominante en el mango verde es el almidón, que en la fruta madura es reemplazado en gran parte por sacarosa, glucosa, y fructuosa (Espinosa Solís, 2009). Bello-Pérez, *et al.* (2005) reportaron que el almidón de mango posee un contenido de amilosa de aproximadamente 13 %, 0,1-0,12 % de grasa (en la variedad “criollo”), similar al almidón de maíz comercial (0,2 %); y una mayor cantidad de cenizas (0.2-0.4 %) que el almidón de maíz. Los mismos autores se refieren a la morfología del gránulo de almidón de mango: tamaño de partícula más pequeño (10  $\mu\text{m}$ ) que el almidón de maíz (15  $\mu\text{m}$ ), junto con un patrón de difracción de rayos X de tipo A con una ligera tendencia a tipo C. En cuanto a valores de solubilidad e hinchamiento, éstos son directamente proporcionales al incremento de temperatura y, en general, el almidón de mango tuvo valores más altos que el de maíz. La temperatura de gelatinización depende de la variedad de mango, y pueden ser más bajas o mejores que para el almidón de maíz. Por todo ello se concluyó que, debido a sus propiedades morfológicas, fisicoquímicas y funcionales, los almidones de mango podrían ser una fuente de almidón factible con propiedades adecuadas para su uso en la industria alimentaria.

**Plátano (*Musa paradisiaca* L):** el polisacárido predominante en el fruto del plátano en estado inmaduro es el almidón (Espinosa Solís, 2009). Zhang, *et al.* (2005) reportaron que el almidón de banana tiene el potencial de ser un almidón de productos básicos debido a sus propiedades específicas y su producción potencial a partir de plátanos de desecho de bajo costo. La pulpa de plátano verde contiene hasta 70-80% de almidón en peso seco, un porcentaje comparable al del endospermo del grano de maíz y la pulpa de la papa blanca. El contenido de amilosa es distinto, según la variedad de

plátano, y va desde 10 hasta 40.7 %. Este almidón se agrupa en gránulos de forma irregular entre las formas alargadas y esferoides. Las formas esferoides varían de 15 a 40  $\mu\text{m}$  de diámetro. Los gránulos alargados miden de 7-25  $\mu\text{m}$  de ancho y 20-50  $\mu\text{m}$  de longitud. Las propiedades fisicoquímicas, al igual que en otras fuentes, son distintas según la variedad del fruto.

Se sabe que el almidón de plátano crudo nativo es resistente al ataque de  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa, por lo que presenta potencial, tanto por sus propiedades digestivas como funcionales, para tener aplicaciones en alimentos procesados y convertirse en un producto de almidón comercialmente viable (Zhang, *et al.*, 2005).

**Manzana (*Malus domestica* B.):** este fruto, al igual que el mango, es más rico en almidón cuando se encuentra en estado de inmadurez. En un estudio realizado por Stevenson, *et al.* (2006) para distintas variedades de manzana, encontraron que la manzana inmadura posee 44-53 % de almidón (base seca). El contenido aparente de amilosa fue alto (40-48 %), pero la longitud media de la cadena ramificada de la amilopectina fue larga, dando como resultado un contenido absoluto de amilosa de 26-29 %.

#### **5.1.4.2. Tubérculos y raíces**

En el caso de la yuca (*Manihot esculenta*), se han realizado diferentes estudios sobre este tubérculo para diferentes aplicaciones, uno de ellos va orientado a su uso como fuente de almidón. Su ventaja está asociada a la concentración de almidón presente, que oscila entre un 72.9 y un 87.9% (Zinn & DePeters, 1991). Los almidones de yuca muestran un contenido de amilosa que varía de 14 a 19% (Rivera-Andrade, 2017).

Vargas-Aguilar & Hernández-Villalobos (2012), indican en su trabajo algunas raíces tropicales que se han dejado de utilizar como fuente de almidones, tales como el camote (*Ipomea batatas*), el ñame (*Dioscorea* sp.) y el ñampí (*Colocasia esculenta*).

Por su parte, Poot-Matu, *et al.* (2002) indican otras raíces tropicales como posibles fuentes alternativas de almidón, entre ellas las siguientes: macal (*Xanthosoma sagittifolium* Schott), macal chino (*Xanthosoma violaceum* Schott), papa voladora (*Dioscorea bulbifera* L.), sagú (*Maranta arundinacea* L.), jengibre (*Zingiber officinale* Roscae), malanga (*Colocasia esculenta* Schott), azafrancillo (*Escobedia linearis* Schlecht) y suco (*Calathea macrosepala* (Aubl.) Lindl.).

## **5.2. Propiedades físico-químicas**

Tovar (2008) explica que las propiedades específicas del almidón en cada especie, afectan características como la textura, el volumen, la consistencia, la humedad y la vida de anaquel de los alimentos. Entender cómo controlar o seleccionar las propiedades del almidón para cada proceso o producto, ha sido objeto de varias investigaciones.

La proporción de amilosa y amilopectina varía entre las distintas especies y variedades de vegetales (tabla 1). Generalmente la amilosa y la amilopectina se producen en plantas en una relación en peso de 1: 3 (Velíšek, 2014). Estas 2 moléculas poseen propiedades físicas y químicas muy diferentes, que influyen en las características de los alimentos (Yúfera, 1998). La proporción relativa de amilosa y amilopectina es importante en la determinación en las propiedades físicas (Ej. temperatura de gelatinización del almidón), funcionales y nutricionales de los almidones (Araneda, 2015).

**Tabla 1:** Contenido de almidón y su composición en importantes fuentes.

FUENTE	ALMIDÓN (%)	AMILOSA <sup>a</sup> (%)
Amaranto	48-69	0-22
Arroz	70-80	8-37
Avena	40-56	25-29
Batata (Papa dulce)	10-30	19-25
Casava	28-35	17-19
Cebada <sup>b</sup>	52-62	38-44
Centeno	52-57	24-30
Judías <sup>c</sup>	46-54	24-33
Maíz	65-75	24-26
Papa <sup>d</sup>	17-24	20-23
Trigo	59-72	24-29

Fuente: Velíšek (2014).

<sup>a</sup> El contenido de amilopectina corresponde a la diferencia de 100% menos el contenido de amilosa.

<sup>b</sup> La cebada c erea contiene 2-8% de amilosa, el maíz cereo alrededor de 1%, y el centeno y maíz rico en amilosa contiene 60-70% de amilosa.

<sup>c</sup> Las lentejas y semillas maduras de guisantes contienen niveles similares de almidón y amilosa respecto a las alubias. Los guisantes verdes contienen alrededor de 4% de almidón, el poroto de soya contiene menos de 1% de almidón.

<sup>d</sup> El contenido de almidón de las variedades de papas desarrolladas se ubica en el límite más alto del rango.

El almidón nativo es un buen estabilizador y regulador de la textura en los sistemas alimentarios, pero las limitaciones, como la baja resistencia al corte, la resistencia térmica, la descomposición térmica y la alta tendencia a la retrogradación, limitan su uso en algunas aplicaciones alimenticias industriales (Hui, *et al.* 2009); aunque V rgas-Aguilar & Hernández-Villalobos (2012) mencionan que, industrialmente, el rango amilosa/amilopectina se puede manipular genética, física y químicamente para modificar las características propias, como la viscosidad, gelatinización, textura,

solubilidad, estabilidad del gel y retrogradación, para darle propiedades industriales estables.

### **5.3. Usos en la industria manufacturera**

El almidón es una materia prima versátil, por sus diversas propiedades es utilizado para ciertas aplicaciones industriales como la fabricación de pegamentos, pinturas, espesantes y texturizantes en las industrias del papel y textil, y en la producción de bioenergéticos (bioetanol) (Tovar, 2008). Díaz Barrera (2015) enuncia algunos usos de los almidones en diferentes ramas de la industria manufacturera:

**Industria textil:** para mejorar el acabado de las telas después del procesamiento de teñido, blanqueado y estampado.

**Industria papelera:** como agente para el encolado interno y recubrimiento del papel con el objeto de mejorar las uniones entre fibras y para retener las cargas y partículas finas.

**Industria farmacéutica:** en la elaboración de cremas, pomadas y en comprimidos como agente de relleno, aglutinante, dispersante y en revestimiento de capsulas.

**Industria cosmética:** para las formulaciones de talcos perfumados y en la elaboración de maquillajes.

### **5.4. Usos en la industria de alimentos**

Los almidones son también importantes componentes naturales de muchos productos alimenticios, afectando de manera significativa o determinando su textura y propiedades funcionales. Los almidones nativos y modificados se utilizan como aditivos en muchos productos como agentes de volumen y espesantes, agentes gelificantes, ligantes de

agua, sustitutos de grasas, encapsuladores de aromas y estabilizantes de espumas o emulsiones de olor activo (Araneda, 2015).

En general, es usado para los siguientes propósitos (Díaz Barrera, 2015):

- Como agente espesante en los enlatados, sopas y salsas. En la industria de la panificación y manufactura de galletas. Como ingrediente en las formulaciones de alimentos en polvo y deshidratados.
- Agente para espolvorear, combinado con azúcar en polvo en gomas caramelos y gomas de mascar.
- Como emulsificantes: produce una emulsión estable en la preparación de mayonesa y salsas similares; donde se necesita emulsiones estables.

## **5.5. Calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK)**

### **5.5.1. Generalidades**

La calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) (Fig.6), es una planta herbácea, esencialmente rastrera, perenne, por lo general despidiendo un fuerte olor; raíces principales engrosadas, tuberosas, fusiformes, napiformes o claviformes, frecuentemente alcanzando grandes dimensiones (hasta 2 m de profundidad y 25 cm de diámetro); tallos más o menos rollizos a ligeramente anguloso sulcados al secar, densamente escabroso-pubescente-aculeolados, enraizando en los nudos pero nunca formando raíces tuberosas; pecíolos robustos, de 4.5 a 14 cm de largo, escabroso-pubescente-aculeolados, láminas foliares usualmente triangulares o triangular-sagitadas, de 12 a 26 cm de largo y 7 a 20 cm de ancho en la base, enteras a muy ligeramente angulosas o lobadas cerca de la base, rara vez 3 a 5 anguloso-lobadas y con un lóbulo central bien definido (Lira, 2001).



**Figura 6.** Planta de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) (Melaragno, 2011) y raíz (foto tomada en laboratorio).

Esta especie se encuentra ampliamente distribuida desde el oeste y el centro de Estados Unidos hasta el centro de México. E.U.A; por lo que se encuentra en estados como Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato. Se considera una planta abundante y sin problemas de extinción en la actualidad (Lira, 2001).

### **5.5.2. Composición química**

Según reportan Royo-Márquez, Melgoza-Castillo y Sierra-Tristán (2003), el fruto contiene hasta 23% de proteína. Lira, *et al.* (2009) refieren que, de acuerdo a estudios realizados, se registran en sus semillas altos contenidos de aceites (30.4%) y proteínas (35.4%), y hasta 52% de almidones en sus raíces, lo que ha llevado a sugerirla como un recurso de potencial importancia para ser explotado como un nuevo cultivo en áreas de extrema aridez.

## **VI. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1. Obtención del almidón**

Con el fin de obtener el material de trabajo, se procedió a la recolección del material biológico.

El material necesario para la realización de los ensayos fue recolectado en el campus Saltillo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, cuyas coordenadas geográficas son 25° 22" de latitud norte y 101° 02" longitud oeste y a una altitud de 1742 msnm (Vázquez-Castillo, 1993).

El clima predominante es muy seco, BW hw (x") (e); semicálido, con invierno fresco, extremoso, con lluvias en verano, y una precipitación invernal superior al 10% del total anual. La precipitación total anual media 350-400 mm; régimen de lluvias: la temporada lluviosa es de junio a octubre. El mes con lluvias más abundante es julio y marzo es el mes más seco y una precipitación invernal superior al 10% del total anual. La temperatura media anual de 19.8 °C. Las heladas comienzan en noviembre y son más intensas en enero (hasta -10 °C). Terminan en marzo, aunque en algunas ocasiones pueden presentarse ligeras heladas en abril.

En cuanto a las características del suelo, éste es de textura migajón y migajón arcillosa, con bajos contenidos de materia orgánica y poseen una capa subyacente de carbonato de calcio.

El método de extracción fue manual, cavando alrededor de la raíz tuberosa hasta lograr su extracción total, tratando de no lastimar los tejidos y de eliminar toda la materia extraña posible.

Posteriormente, las raíces fueron transportadas al laboratorio del departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos para proceder a su procesamiento.

#### **6.1.1. Tratamiento de las raíces**

Al material vegetal fresco se le realizó la limpieza general, eliminando residuos de tierra a través primero de un cepillado, y luego de un lavado con agua corriente del grifo hasta la eliminación de la totalidad de la suciedad; luego se realizó un mondado eliminando la corteza externa y se seccionó en pequeños cubos para el almacenamiento en congelador a -18 °C.

#### **6.1.2. Molienda de las raíces**

Se descongeló el material biológico en cuarto frío a 4 °C, para luego molerlo en licuadora a velocidad máxima adicionando agua purificada en una relación 3:1, hasta obtener un material pastoso. El ligero oscurecimiento enzimático es parecido al que se desarrolla en tejidos parenquimales expuestos de otras raíces tuberosas.

#### **6.1.3. Filtrado**

El resultado de la molienda de las raíces se filtró en una bolsa confeccionada de tela de lino, realizando lavados con agua purificada hasta lograr extraer la mayor parte del almidón, separándolo de la fibra de la raíz, lo que se determinó hecho una vez eliminada la turbidez en la corriente de agua.

#### **6.1.4. Secado y pulverizado**

Se dejó reposar 24 h a 4 °C, posteriormente se decantó. El precipitado se depositó en una charola de vidrio y se sometió a secado en una estufa Novatech a 55 °C durante 24 h, para después pulverizar en mortero de porcelana, y se almacenó posteriormente en bolsas ziploc® previamente identificadas.

### **6.2. Purificación del almidón**

#### **6.2.1. Lavado**

El almidón se sometió a lavado con agua purificada hasta alcanzar un pH cercano a 7, a fin de eliminar la totalidad de la acidez, debido a que algunos autores han reportado presencia de cloro en esta planta; el proceso fue monitoreado con un potenciómetro HANNA® portátil. Posteriormente se dejó decantar el material a temperatura de 4 °C durante 4 h para eliminación del exceso de agua.

#### **6.2.2. Secado**

Se colocó el precipitado en una charola de vidrio en estufa Novatech a 55 °C durante 24 h, luego se pulverizó en mortero de porcelana.

#### **6.2.3. Desgrasado**

Se siguió la metodología reportada por Gómez-López (2013) con algunas modificaciones. Se confeccionaron sobres de papel filtro de poro cerrado, en los que se depositó el almidón, mismos que se colocaron en un vaso de precipitado con capacidad de 1 L y se cubrieron a totalidad con éter de petróleo anhidro ACS por un tiempo de 4 h, para después escurrir los sobres, y se llevaron a secado en estufa Novatech durante 2 h.

El almidón desgrasado y seco se pulverizó en un mortero de porcelana y posteriormente se tamizó en malla No. 60 (con abertura aproximada de 250  $\mu\text{m}$ ) a fin de uniformizar lo más posible el tamaño de partícula y se almacenó en bolsas ziploc®.

### **6.3. Análisis proximal**

Las determinaciones se realizaron por triplicado para después analizarse estadísticamente en software Office Excel 2013®.

#### **6.3.1. Humedad**

Según la técnica AOAC 925.45 (2005): se colocaron 3 crisoles en estufa hasta lograr un peso constante, posteriormente se colocó 1 g de almidón en cada crisol, pesado en balanza analítica, y se llevó a secado en estufa Novatech a 105 °C durante 24 h.

Transcurrido el tiempo se pesaron las muestras en balanza analítica y el % de humedad se obtuvo por diferencia de peso.

#### **6.3.2. Proteína**

Según la técnica AOAC 968.05 (2005): se pesaron 0.05 g de muestra y se introdujo cada una en matraz para micro-Kjeldahl y se agregaron 4 mL de mezcla digestora. Se corrió también un blanco, consistente sólo en 4 mL de mezcla digestora. Se colocaron en parilla para iniciar la digestión dentro de cámara de extracción por un periodo de 4 a 5 horas, hasta obtener un color verde cristalino en la mezcla.

La muestra digerida se pasó a un destilador micro-kjeldahl. En primer lugar se corrió un blanco. Se añadieron al sistema 40 mL de NaOH para que se llevara a cabo la reacción y se recuperó el destilado en un vaso de precipitado que previamente se preparó con

30 mL de ácido bórico al 4%, adicionando unas gotas de indicador mixto para proteínas. El proceso terminó al momento que se consiguió un volumen de destilado de 30 mL.

El destilado obtenido se tituló con ácido sulfúrico 0.033 N hasta lograr el cambio de color en la solución y se capturó el dato de mL gastados para realizar el cálculo correspondiente a la cuantificación de proteínas. Se utilizó factor de conversión 6.25.

### **6.3.3. Extracto etéreo**

Según la técnica AOAC 920.39 (2005): se sometieron 3 matraces bola a peso constante durante 24 h a 150 °C agregando 6 perlas de vidrio a cada uno, posteriormente se pesó 1 g de la muestra por repetición y se elaboraron paquetes de papel filtro para introducir en el sifón del equipo soxhlet.

Se agregaron 300 mL de éter etílico anhidro ACS a cada matraz bola y se colocó el sistema sobre una mantilla de calentamiento para iniciar el proceso de lavado durante 6 h a 60 °C.

Al término de este tiempo se recuperó el éter por medio del sifón hasta obtener por completo el reactivo. Los matraces se sometieron nuevamente a peso constante en estufa a 150 °C por 24 h para posteriormente pesarlos en balanza analítica y, por diferencia de pesos, obtener el contenido de grasa de la muestra.

### **6.3.4. Fibra cruda total**

Se llevó a cabo el análisis de fibra cruda en alimentos, con la técnica de bolsa de filtro, extraído de la AOCS (American Oil Chemists' Society), procedimiento aprobado BA 6<sup>a</sup>-05.

**Preparación de reactivos:** Se preparó solución de ácido sulfúrico 0.255 N y solución de hidróxido de sodio 0.313 N.

**Preparación de la muestra:** Se realizó de acuerdo al apartado 6.2.3 de este documento.

**Procedimiento de fibra cruda:** se colocó 1 g de muestra preparada en cada una de las 3 bolsas, se sellaron las bolsas con sellador de calor para encapsular el almidón dentro de la bolsa. Las bolsas con muestra se colocaron en equipo Bag Suspend. Se agregó la solución de ácido sulfúrico para posterior agitación en el equipo durante 40 min con la tapa del equipo cerrada al vacío, transcurrido el tiempo se desechó el ácido y después se realizaron 2 lavados con agua destilada caliente durante 5 min, posteriormente se agregó la solución de hidróxido de sodio y se encendió la agitación durante 40 min con la tapa cerrada al vacío. Se llevó a cabo un segundo lavado con agua destilada caliente hasta la neutralidad, y posteriormente con éter etílico anhidro ACS para eliminar el exceso de agua. Las bolsas se secaron en estufa Novatech por 4 h a 60 °C, posteriormente se incineraron dentro de crisoles, puestos previamente a peso constante, en mufla Vulcan® a 600 °C. La cantidad de fibra se determinó por diferencia de peso entre la muestra original y el peso de las cenizas.

#### **6.3.5. Cenizas totales**

Según la técnica AOAC 923.03 (2005): se colocaron los crisoles a peso constante en una estufa a 150 °C durante un tiempo de 24 h, posteriormente se metieron en desecado por 30 min para pesarlos en balanza analítica y se agregó 3 g de muestra a cada crisol para calcinar con mechero hasta quemar la materia orgánica.

Posteriormente, los crisoles se pasaron a mufla Vulcan® a 500 °C durante 2 h hasta dejar solo las cenizas, y luego se enfriaron en desecador durante 30 min. Mediante diferencia de pesos se obtuvo el porcentaje de cenizas presente.

#### **6.3.6. Pureza**

El análisis se realizó mediante la cuantificación de absorbancia por espectrofotometría de luz visible (López-Cázares, 2009). Se elaboró solución de almidón comercial con agua destilada con el fin de realizar curva de calibración.

Preparación de solución de yodo: preparación de solución de stock disolviendo 0.55 g de cristales de yodo y 1.1 g de yoduro de potasio en agua y se completó a 25 mL con agua destilada en un matraz de aforación. Para la preparación de solución diluida de yodo se tomaron 2 mL y se aforaron con 100 mL con agua destilada.

Determinación de almidón: en un tubo de ensaye se colocó 10 mL de solución diluida de yodo, 9 mL de agua destilada y 1 g de muestra, se homogenizó y se leyó absorbancia en un espectrofotómetro Genesis® a 620 nm.

Los análisis siguientes, a excepción de las micrografías, se llevaron a cabo con muestras de material por triplicado en el laboratorio de carbohidratos, empaques y alimentos funcionales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., en la unidad ubicada en Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua. Las pruebas se realizaron por triplicado y los resultados se sometieron a análisis ANOVA y t-sudent ( $p \leq 0.05$ ).

#### **6.3.7. FTIR: Análisis de Infrarrojo con Transformada de Fourier**

Para identificar los grupos funcionales presentes en la muestra, se realizó una determinación por FTIR (espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier), de

acuerdo a Mano *et al.* (2003) en un espectrómetro infrarrojo Perkin Elmer® modelo *Spectrum Two* con un accesorio de reflectancia total atenuada (RTA).

### **6.3.8. Calorimetría diferencia de barrido (DSC)**

Se determinaron las propiedades térmicas de los almidones con un calorímetro diferencial de barrido (DSC 4000, Perkin Elmer, Massachusetts, EUA) de acuerdo con el procedimiento descrito por Paredes-López *et al.* (1994), con ligeras modificaciones. Se pesaron 2 mg de almidón base seca en una charola de aluminio y se mezclaron con 7  $\mu$ L de agua destilada. Las charolas se cerraron herméticamente y se dejaron reposar durante 1 h a temperatura ambiente para el equilibrio de la humedad. Posteriormente, las charolas se calentaron de 30 a 120 °C a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. Las transiciones térmicas de la muestra de almidón se definieron como temperatura de inicio ( $T_o$ ), temperatura de pico de gelatinización ( $T_p$ ), temperatura de conclusión de gelatinización ( $T_f$ ) y entalpía de gelatinización ( $\Delta H_{gel}$ ).

### **6.3.9. Propiedades reológicas**

#### **6.3.9.1. Propiedades de flujo**

La caracterización reológica del almidón se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Tirado-Gallegos *et al.* (2016) con ligeras modificaciones. Se prepararon dispersiones de almidón (5 % p/p) en agua destilada y se dejaron agitar lentamente durante 15 min. Posteriormente, la muestra se colocó sobre la placa Peltier de calentamiento de un reómetro AR 1500ex (TA Instruments, Delaware, EUA) con una geometría de placas paralelas (acero inoxidable, diámetro de 60 mm, gap de 1000  $\mu$ m). El sistema de placas paralelas se cubrió con una trampa y aceite mineral para prevenir la pérdida de humedad. El reómetro se programó para calentar y enfriar la muestra a

una velocidad de corte y calentamiento constantes de  $50 \text{ s}^{-1}$  y  $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , respectivamente. La muestra se calentó de  $25$  a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  manteniéndose a esta temperatura durante  $10 \text{ min}$ , después de este tiempo, la muestra se enfrió a  $25$ ,  $50$  y  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cuando la muestra alcanzó la temperatura final de enfriamiento ( $25$ ,  $50$  y  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se realizaron tres barridos rotacionales para evaluar las propiedades de flujo. Se aplicaron dos barridos consecutivos, uno ascendente y otro descendente a una velocidad de corte de  $0.06$  a  $500 \text{ s}^{-1}$ , el tercer barrido fue ascendente de  $1$  a  $500 \text{ s}^{-1}$ . Los datos se ajustaron al modelo de Ostwal-De Waele (Ley de La Potencia).

#### **6.3.10. Propiedades viscoelásticas**

Las propiedades viscoelásticas de los almidones de calabacilla loca se determinaron de acuerdo con la metodología reportada por Singh *et al.* (2005) con ligeras modificaciones. Se utilizó el mismo equipo y configuración (placas paralelas y diámetro de  $60 \text{ mm}$ ) que en las curvas de flujo. El gap se ajustó a  $1000 \text{ }\mu\text{m}$ . Se preparó una dispersión de almidón al  $20 \text{ } \%$  (p/p) en agua destilada y se mantuvo bajo agitación durante  $15 \text{ min}$ . La dispersión de almidón se depositó sobre la superficie de la placa de calentamiento del reómetro precalentada a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , se cubrió con una trampa y aceite mineral para evitar la pérdida de humedad. La dispersión de almidón se enfrió y calentó a una velocidad de calentamiento-enfriamiento constante de  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . Primeramente, se calentó de  $40$  a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , la muestra se mantuvo a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  durante  $30 \text{ min}$  y finalmente, la muestra se enfrió de  $90$  a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se evaluaron los cambios en los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ) durante el calentamiento-enfriamiento bajo un porcentaje de deformación del  $1 \text{ } \%$ , el cual estuvo dentro de la región viscoelástica lineal (RVL).

Para evaluar la dependencia de los módulos  $G'$  y  $G''$  a los barridos de frecuencia, utilizando la metodología reportada por Mendez-Montealvo *et al.* (2006). Se preparó una dispersión de almidón al 5 % (p/p) y se mantuvo bajo agitación durante 15 min. La dispersión se depositó sobre la placa Peltier del reómetro con una configuración de placas paralelas (diámetro = 60 mm, gap = 1000  $\mu$ m) y se cubrió con una trampa y aceite mineral. En la primera etapa de calentamiento el reómetro se programó para calentar la muestra de 25 a 90 °C y mantenerla durante 10 min a 90 °C. En la segunda etapa, la muestra se enfrió de 90 a 25 °C. Ambas etapas se realizaron a una velocidad de calentamiento-enfriamiento de 2.5 °C/min y una frecuencia de 1 Hz. Al final de la primera y segunda etapa se realizaron barridos de frecuencia (0.1-10 Hz) con un porcentaje de deformación del 1 %, el cual se encontró dentro de la RVL.

#### **6.3.11. Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM)**

A fin de identificar la morfología de los gránulos del almidón obtenido, se colocaron 0.1 g de muestra en un tubo de ensaye, al que se le adicionaron 9.9 mL de agua destilada y 1 gota de lugol, y se llevó a agitación por 1 min. Se tomó una alícuota de la solución anterior y se colocó en un portaobjetos, para luego cubrirla con un cubreobjetos y se observó en microscopio óptico a 100X y 400X, capturando las imágenes con un ocular USB Quasar® para microscopio, utilizando el software de captura Future Win Joe®.

Para lograr las micrografías en microscopio electrónico de barrido (SEM), las muestras fueron remitidas al Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 7.1. Purificación del almidón

Una vez concluida la ejecución de la metodología de extracción y purificación, se obtuvo cantidad suficiente de un material consistente en un polvo blanco, suave al tacto, sin olor, con las características propias de un almidón.

Se procedió entonces a la ejecución de la metodología descrita para el análisis proximal, cuyos resultados se enuncian y discuten en el siguiente apartado, y posteriormente a la determinación de las propiedades reológicas y térmicas del material, así como a la caracterización morfológica de sus gránulos.

### 7.2. Análisis del almidón

#### 7.2.1. Análisis proximal

Los resultados del análisis proximal del almidón estudiado, en base seca, se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Composición química del almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK).

Parámetro	Contenido en %
Humedad	9.71±0.23
Proteína	0.815 ± 0.02
Extracto etéreo	0.203±0.003
Fibra cruda	0.00
Cenizas	0.415±0.07

(Valores promedio de tres repeticiones ± desviación estándar).

Los datos obtenidos en cuanto a proteína y cenizas resultaron más altos que los reportados por Dreher y Berry (1983) para almidones de la misma especie, pero en

cosechadas en diferente estación del año; a diferencia del contenido de grasa total, que fue menor en la muestra analizada en este estudio respecto a la reportada por los citados autores (0.92-1.14 %).

En comparación con almidones de maíz y trigo, Guízar-Miranda (2009) reportó un contenido promedio de 0.35 y 0.4 % de proteína, 0.6 y 0.8 % de grasa total y 0.1 y 0.15 % de cenizas, respectivamente. Los contenidos de proteína y cenizas resultaron mayores en el almidón de raíz de calabacilla loca, no así el contenido de grasa total, donde el contenido fue menor que el reportado por el autor anteriormente mencionado para ambos cereales.

Para el caso del almidón de la papa, Díaz-Barrera (2015) encontró que el contenido de grasa total es mucho menor (0.027-0.06 %) que el encontrado en este caso en el almidón de raíz de calabacilla loca; sin embargo, Guízar-Miranda (2009) indicó hasta 0.18 % de grasa total para el almidón de papa, valor similar al de este estudio. El contenido de proteínas en el almidón de papa reportado por Díaz-Barrera (2015) va desde 0.21 a 0.82 %, valor máximo similar al encontrado en este estudio para el almidón de raíz de calabacilla loca, mientras que Guízar-Miranda (2009) reportó un 0.6 %. Para la fibra cruda, Díaz-Barrera (2015) encontró contenidos de 0.01-0,03 % para la papa, y Guízar-Miranda (2009), mientras que en el almidón de raíz de calabacilla loca el contenido fue nulo. Por último, en cuanto al contenido de cenizas, para la papa Díaz-Barrera (2009) reportó un contenido de 0.08-0.23 %, mientras que Guízar-Miranda (2009) indicó contenidos de hasta 0.34 %, valores por debajo de los obtenidos para el almidón de raíz de calabacilla loca.

Por otro lado, en comparación con almidones de tubérculos tropicales, como el del ocumo (Palomino, *et al.* 2010), el contenido de proteína resultó ausente en este caso, el

contenido de grasa total (extracto etéreo) resultó no significativamente mayor (0.28-0.33 %) al de la raíz de calabacilla y el contenido de cenizas fue menor que para la muestra estudiada (0.09-0.19 %).

Las diferencias en la composición del análisis proximal podrían obviarse dado que se trata de diferentes especies, o bien a las condiciones en las que se desarrollaron las plantas, como lo comentó Marínn-Herbert (2013); sin embargo, el método de extracción también es un factor importante. Por ejemplo, en cuanto al contenido de grasa, Guízar-Miranda (2009) comentó que la extracción de lípidos con éter de petróleo sólo remueve los presentes en la periferia de los gránulos, y no los asociados a la estructura interna de los mismos. Según lo comentaron Copeland *et al.* (2009), los complejos entre la amilosa y los lípidos, como los ácidos grasos, los lisofosfolípidos y los monoacilglicéridos, pueden modificar significativamente las propiedades y la funcionalidad del almidón en todos los aspectos que interesan a la industria alimentaria y a la nutrición humana. Por ejemplo, la complejación con lípidos reduce la solubilidad del almidón en el agua, altera las propiedades reológicas de las pastas, disminuye la capacidad de hinchamiento, aumenta la temperatura de gelatinización, reduce la rigidez del gel, retarda la retrogradación y reduce la susceptibilidad a hidrólisis enzimática.

Por otro lado, en cuanto al contenido de proteína, Bello-Pérez, *et al.* (2002) indicó que las diferencias podrían resultar de los lavados con agua durante el proceso de extracción de los almidones.

### **7.2.2. Pureza**

Para este estudio, se realizó una curva de calibración con almidón grado reactivo, cuya ecuación lineal resultó con coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9464$ . Leídas tres

repeticiones en el espectrofotómetro a 630 nm, se obtuvo que la muestra contiene en promedio un  $93.77 \pm 2.86$  % de pureza, en base seca. Este nivel de pureza resultó inferior al reportado para otros tubérculos tropicales, como los reportados por Palomino, *et al.* (2010). Díaz Barrera (2009) obtuvo un porcentaje menor de almidón en su estudio para papa nativa (88.09-88.84 %) respecto al obtenido en este estudio.

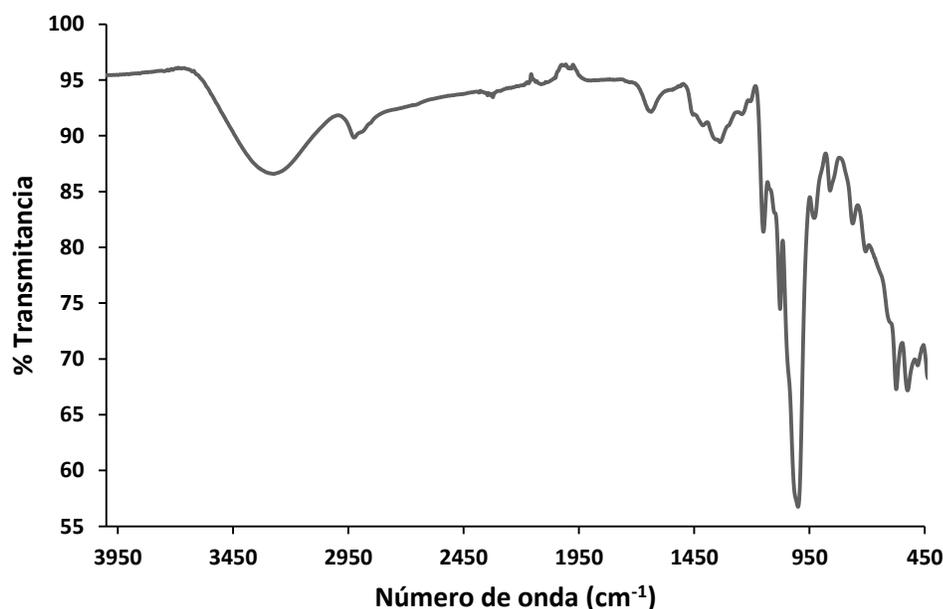
Las diferencias en el porcentaje de almidón entre los diferentes estudios de referencia y el obtenido para almidón de raíz de calabacilla loca podrían estar fincadas en varias razones, entre ellas: la diferencia entre especies, las condiciones de crecimiento y cosecha y la metodología de obtención, como lo mencionan Bello-Pérez, *et al.* (2002), Guízar-Miranda (2009) y Marínn-Herbert (2013), así como el método de determinación empleado.

### **7.2.3. FTIR**

Del seguimiento y ejecución de la metodología referida, se obtuvo el espectro para el almidón de raíz de calabacilla loca que se muestra en la Figura 7.

El espectro exhibe señales características de un almidón nativo (Seetharaman, *et al.* 2001; Narváez-González, *et al.* 2007; Mina, *et al.* 2009; Enríquez, *et al.* 2013; Torres-Becerril, *et al.* 2015); donde la presencia de la banda ancha de absorción entre los  $3000-3550\text{ cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento del enlace de los grupos OH. También se observó una banda a los  $2900\text{ cm}^{-1}$  atribuida al estrechamiento de los grupos  $\text{CH}_2$ , y cerca de los  $1600\text{ cm}^{-1}$  apareció un pico de flexión, el cual evidenció agua ligada a la región amorfa. Posteriormente, se apreciaron los picos en la región de los 450 a  $1250\text{ cm}^{-1}$  (región de “huella dactilar” para polisacáridos), correspondientes a las vibraciones de las uniones C-O-C y C-O-H de la glucosa (Torres-Becerril, *et al.* 2015). En esta

región, los picos cercanos a los 900, 800, 700 y 550  $\text{cm}^{-1}$  se han atribuido al anillo piranósico (Chi, *et al.* 2007; Torres-Becerril, *et al.* 2015). Esto es congruente con lo que reporta Rivera-Andrade (2017) para la harina de raíz de calabacilla loca.



**Figura 7.** Espectro de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) correspondiente al almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK)

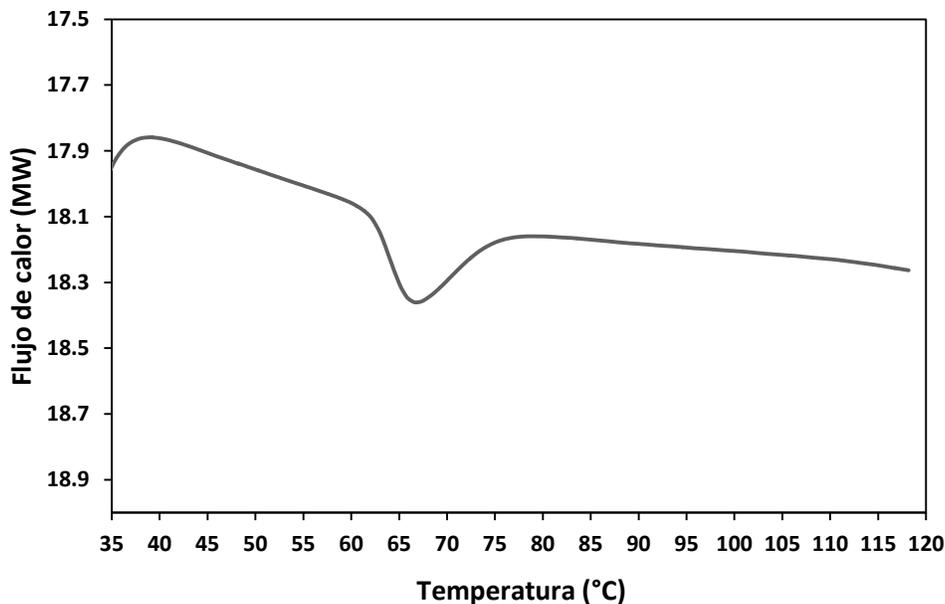
#### 7.2.4. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Derivado del análisis térmico practicado a la muestra de almidón en estudio, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3, correspondiente a las temperaturas de inicio ( $T_0$ ), pico ( $T_p$ ) y final ( $T_f$ ) de gelatinización, así como la entalpía de gelatinización ( $\Delta H$ ), y la Figura 8, correspondiente al termograma resultante.

**Tabla 3.** Propiedades térmicas de almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK)

$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
$62.21 \pm 0.09$	$66.50 \pm 0.06$	$75.00 \pm 0.17$	$12.27 \pm 0.17$

Valores promedio de tres repeticiones  $\pm$  la desviación estándar.



**Figura 8.** Termograma (DSC) del almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK).

Los resultados mostraron una temperatura de gelatinización para el almidón de raíz de calabacilla loca alrededor de los 66.5 °C ( $T_p$ ), con pico endotérmico que va de los 62.2 °C a los 75 °C; el cual corresponde, según Singh, *et al.* (2007), a la disociación de las moléculas de amilosa y amilopectina dentro de los gránulos de almidón, y la lixiviación de la amilosa a la fase continua; el valor de la temperatura de gelatinización está por debajo de los referidos por Moorthy (2002) para otros tubérculos y raíces tuberosas como la papa dulce y el casave, cuyos valores se indican desde los 63 a 79 °C y de los 54.7 a los 78 °C, respectivamente; con pico endotérmico extendido desde los 50.7 °C hasta los 92 °C. Por otro lado, Hernández-Medina, *et al.* (2008) y Pardo, *et al.* (2013) reportan para almidones de diferentes variedades de papa valores semejantes a la temperatura de gelatinización del almidón de raíz de calabacilla loca, oscilando entre 63.64 °C hasta 69.89 °C. También es muy semejante a la temperatura de gelatinización del almidón de maíz, según lo refieren Hernández-Medina, *et al.* (2008) y Espinosa-Solís (2008), y a la

del almidón de avena, como lo reporta Zamudio-Flores, *et al.* (2015), por lo que este material podría ser candidato para algunas aplicaciones en las que actualmente se utiliza el almidón comercial, como se menciona en el último apartado de esta sección.

En cuanto al valor de la entalpía de gelatinización ( $\Delta H$ ), los almidones de papa estudiados por Pardo, *et al.* (2013) presentaron valores muy por encima del  $\Delta H$  obtenido para almidón de raíz de calabacilla loca, pues van de los 68.05 a los 162.7 J/g, contra 12.27 J/g de este estudio; y semejantes a los reportados por Moorty (2002) para papa dulce y casave, de 10 a 18.6 y 4.8 a 22 J/g, respectivamente. En el almidón de maíz, dicho valor es semejante al del almidón de este estudio, según lo refieren Hernández-Medina, *et al.* (2008) y Espinosa-Solís (2008).

Este comportamiento evidencia que el almidón crudo de raíz de calabacilla loca posee cristalinidad semejante a la del almidón de algunas variedades de papa, como lo menciona Moorty (2002), o al de maíz (Hernández-Medina, *et al.* 2008; Espinosa-Solís, 2008) por lo que la gelatinización comienza en valores de temperatura semejante, aunque para el almidón de muchas variedades de papa el proceso termina bastante más tarde, según lo reportado por Pardo, *et al.* (2013), y su entalpía de gelatinización resulta bastante mayor que la del almidón de raíz de calabacilla loca, posiblemente debido a que la estructura de sus gránulos posee una mayor cantidad de almidón amorfo no asociado a la región cristalina del mismo, como lo comentan Sandoval, *et al.* (2005), Singh, *et al.* (2007), Copeland, *et al.* (2009) y Zamudio-Flores, *et al.* (2015), por lo que este material resulta menos estable para procesos que requieren de temperaturas altas.

## 7.2.5. Propiedades reológicas

Una vez ejecutada la metodología descrita en el apartado correspondiente, se logró la determinación de las propiedades reológicas del almidón estudiado, mismas que a continuación se describen.

### 7.2.5.1. Propiedades de flujo

Se obtuvieron las curvas de flujo de viscosidad (a) y esfuerzo de corte (b) en función de la velocidad de deformación (Fig. 9). Se evidenció un comportamiento típico de un fluido no newtoniano, con características del tipo corte adelgazante o pseudoplástico, ya que la viscosidad a las tres temperaturas de evaluación del almidón disminuyó conforme aumentó la velocidad de deformación, y el esfuerzo de corte aumentó gradualmente de forma no lineal respecto a la misma variable, según lo definen Méndez-Sánchez, *et al.* (2010).

Los datos experimentales de las curvas de flujo se ajustaron a la Ley de Potencia con una bondad en el ajuste de 99 (Tabla 4). Los valores del índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) confirma que el almidón de raíz de calabacilla loca posee un comportamiento pseudoplástico o del tipo corte adelgazante ( $n < 1$ ), característica que comparte con el almidón de avena, como lo han reportado Zamudio-Flores, *et al.* (2015), o con el almidón de otras fuentes convencionales y no convencionales, como el de mango y plátano (Casarrubias-Castillo, *et al.* 2012), y el de otros tubérculos, como la yuca (Sívoli, *et al.* (2012), y que permanece casi constante conforme aumenta la temperatura, lo que podría ser un indicador de la pureza de la muestra, al no observarse alteraciones en este parámetro. Según Casarrubias-Castillo *et al.* (2012), este comportamiento se

denomina reofluidizante y ocurre cuando el esfuerzo desorganiza el arreglo de las moléculas de la matriz.

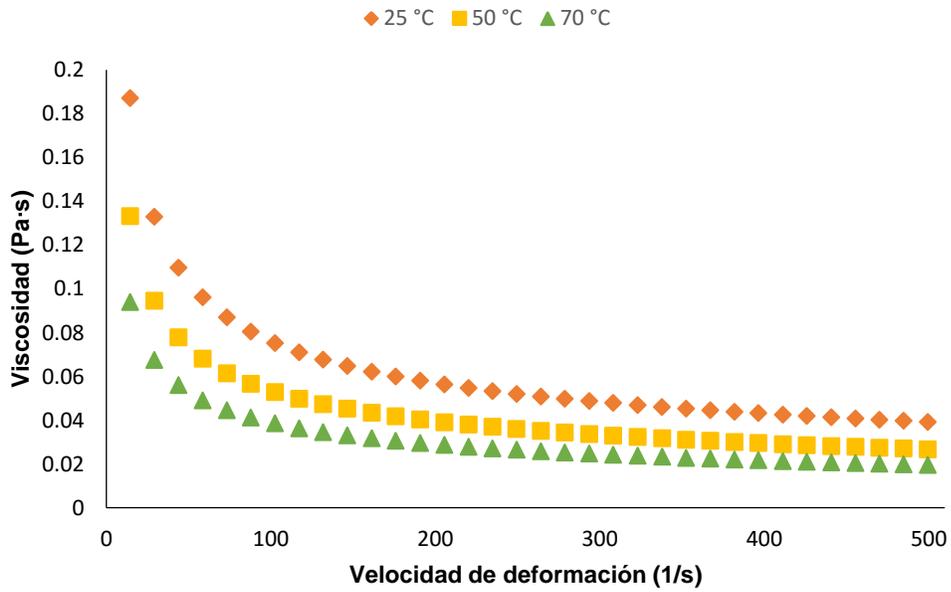
**Tabla 4.** Variables reológicas del modelo de la Ley de Potencia ( $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ ) para almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) (5 % p/p) a 25, 50 y 70 °C.

Temperatura (°C)	$\eta$	$\kappa$ (Pa·s <sup>n</sup> )	R <sup>2</sup>
25	0.57 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.99
50	0.56 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.99
70	0.57 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.99

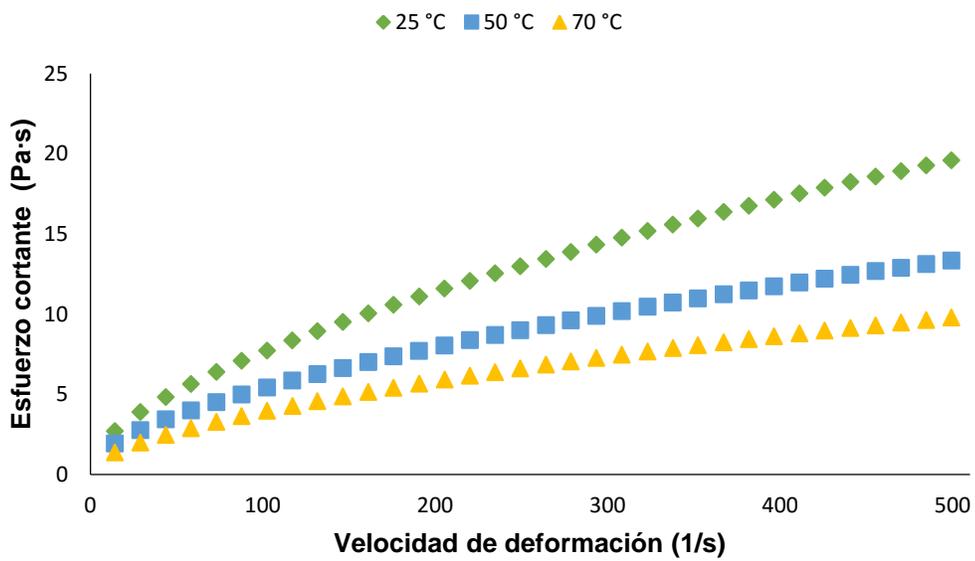
Media aritmética de tres repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra minúscula dentro de las columnas, no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P > 0.05$ ).

Por otro lado, el índice de consistencia ( $\kappa$ ) disminuyó marcadamente conforme se incrementó la temperatura, lo cual fue congruente con las curvas de flujo en la Figura 9(a). Rivera-Andrade (2017) obtuvo en su estudio un comportamiento similar para la harina de raíz de calabacilla loca, y también Sívoli, *et al.* (2012) para el almidón de yuca. El valor para este parámetro resultó menor que el obtenido en otros estudios para cereales, como el maíz (Casarrubias-Castillo, *et al.* 2012) y la avena (Zamudio-Flores, *et al.* 2015).

Según Casarrubias-Castillo, *et al.* (2012), las propiedades de flujo están relacionadas con el tamaño de los gránulos, pero más con la estructura interna de sus componentes; esto es, con la proporción y acomodo de amilosa y amilopectina.



(a)



(b)

**Figura 9.** Variación de la viscosidad (a) y esfuerzo de corte (b) con la velocidad de corte de dispersiones de almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) (5% p/p) a 50, 60 y 70 °C.

### 7.2.5.2. Propiedades viscoelásticas

En cuanto a las propiedades viscoelásticas (Fig. 10), se muestra el comportamiento de la pasta de almidón de raíz de calabacilla loca; en la Figura 10a se observa que ambos módulos mostraron una tendencia a aumentar al máximo durante el calentamiento

inicial, para luego caer con calentamiento adicional. Singh *et al.* (2007) refieren que lo mismo ha ocurrido con otros almidones.

Los autores señalaron en su estudio que en las primeras etapas de calentamiento las moléculas de amilosa se disuelven a partir de los gránulos de almidón, convirtiendo a la suspensión en un sol; pero con el aumento de temperatura, ambos módulos ( $G'$  y  $G''$ ) alcanzaron picos máximos, lo que podría indicar la cadena de sucesos: hinchamiento de los gránulos de almidón, lixiviación, formación de gel, destrucción de la estructura y posterior licuefacción, con la consecuente pérdida de viscosidad.

El valor obtenido para  $T_{G'_{max}}$  este estudio fue similar al que reportaron Singh *et al.* (2007) para el almidón de papa (63.5 °C); sin embargo,  $G'_{max}$  para el almidón de raíz de calabacilla loca resultó más elevado que el del almidón de papa reportado por los mismos autores (4390 Pa), pero con valor de  $G''_{max}$  de 1190 Pa, que es mayor al del almidón de este estudio, lo que revelaría un mayor poder de hinchamiento de éste, pero con una estabilidad menor al del almidón de papa del estudio referido.

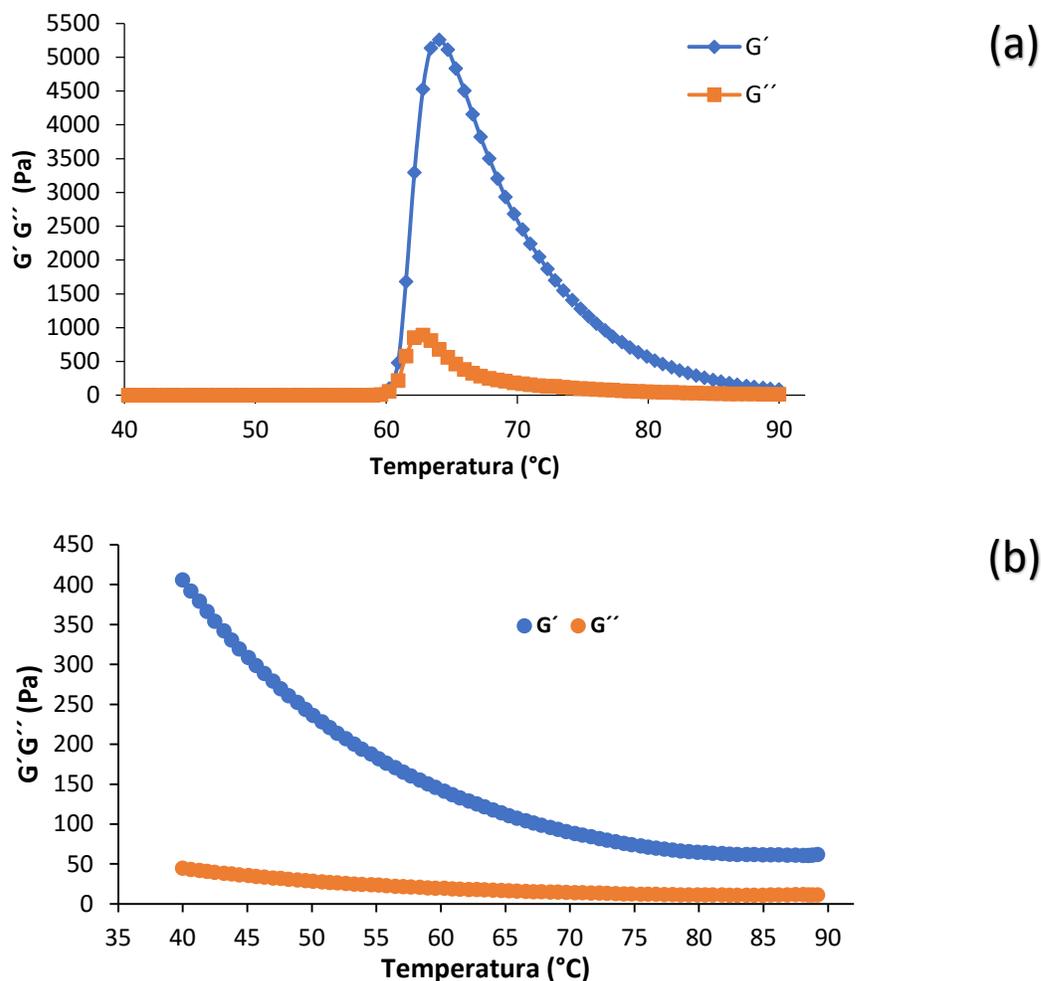
**Tabla 5.** Propiedades viscoelásticas de almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) (5 %, p/p) durante la etapa de calentamiento y enfriamiento.

Etapa	$T_{G'_{MAX}}(^{\circ}C)$	$G'_{MAX}(Pa)$	$G''_{MAX}(Pa)$	$\tan(\delta)$
<b>Calentamiento</b>	64.05 ± 0.03 <sup>a</sup>	5256.83 ± 151.11 <sup>a</sup>	871.82 ± 45.95 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.00 <sup>a</sup>
<b>Enfriamiento</b>	40.00 ± 0.00 <sup>b</sup>	405.40 ± 45.13 <sup>b</sup>	44.24 ± 4.75 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.00 <sup>b</sup>

Media aritmética de tres repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra minúscula dentro de las columnas no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de t de Student ( $P > 0.05$ ).

Reddy y Sieb (2000) sugieren que una caída en los valores de  $\tan(\delta)$  es evidencia de la formación de un gel y puede deberse a la retrogradación de los componentes lixiviados y a la interacción entre las moléculas dentro del gránulo, reforzando la estructura del gel

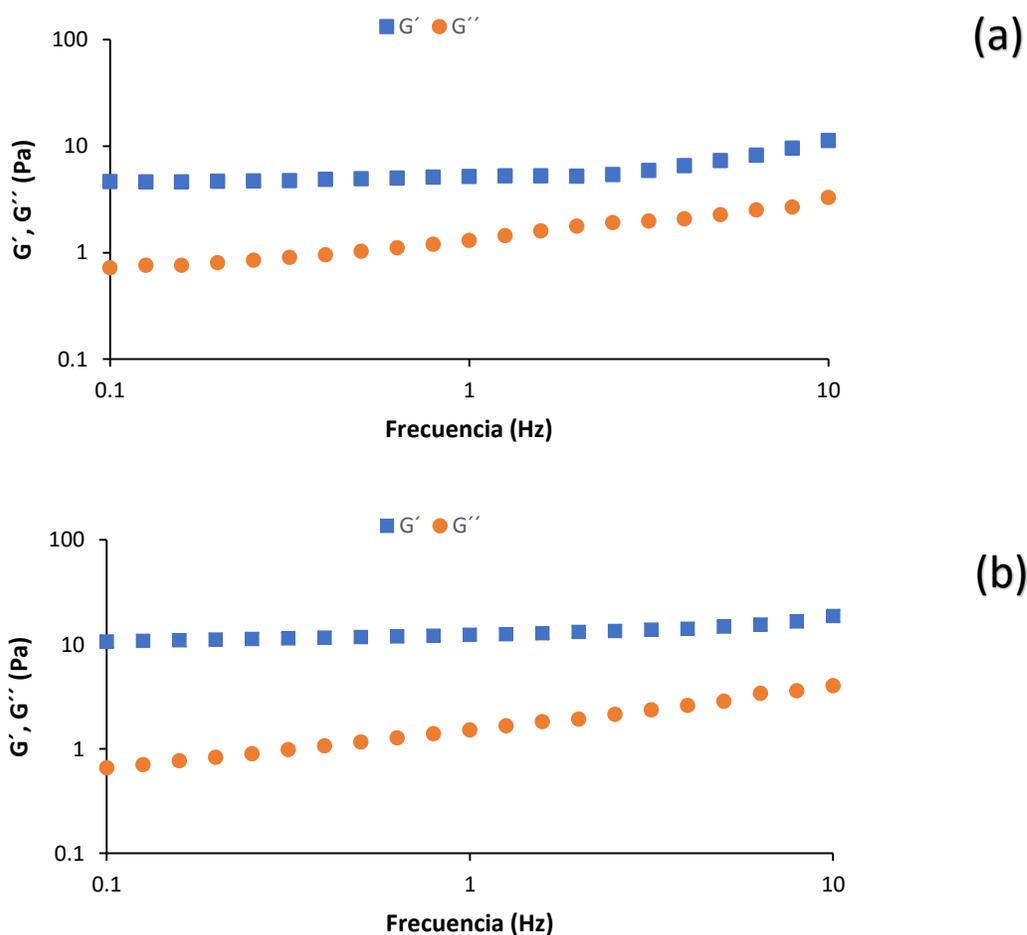
durante el enfriamiento (Hsu, *et al.* 2000). Llama la atención que tanto  $G'$  como  $G''$  alcancen casi el mismo valor al final, lo cual no se observó en ninguno de los estudios consultados, y lo que revela una casi total destrucción de la estructura formada durante el proceso de gelificación al enfriarse el sistema (Fig. 10b), a diferencia de lo que ocurre con almidones de otras fuentes, como los reportados por Sing, *et al.* (2007).



**Figura 10.** Comportamiento del módulo de elasticidad ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) de pastas de almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) al 20% (p/p) durante la etapa de calentamiento (a) y enfriamiento (b). Esfuerzo de deformación = 1%. Frecuencia = 1 Hz

En cuanto a los barridos de frecuencia (Fig. 11), se observó un ligero incremento de la fuerza durante el calentamiento a 90 °C (Fig. 11a), debida al fenómeno de hinchamiento

de los gránulos de almidón; posteriormente, el módulo de pérdida ( $G''$ ) a la misma temperatura mostró una tendencia al alza, lo que podría indicar que los gránulos de almidón no alcanzaron su máximo hinchamiento, de acuerdo con Méndez-Montevalvo, *et al.* (2006). Durante el enfriamiento a 25 °C (Fig. 11b), el módulo de ganancia ( $G'$ ) permaneció constante a ambas frecuencias, mientras que el de pérdida ( $G''$ ) ganó fuerza al aumentar la frecuencia, lo que indicó una mejor estabilidad de la red de gel a 25 °C que a 90 °C, sin aparente pérdida de consistencia, según el mismo estudio referido.



**Figura 11.** Dependencia a la frecuencia del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) de dispersiones de almidón raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) al 20% (p/p) a 25 (a) y 90 °C (b). Esfuerzo de deformación = 1%.

Según Singh, *et al.* (2007), este tipo de relación indica la formación de un gel consistente, pero los valores que resultaron para el almidón de raíz de calabacilla loca no tienen tanta fuerza como los que reportan esos mismos autores para el almidón de papa, ya que esta alcanzó cifras superiores a los 6000 Pa durante el calentamiento, y alrededor de 500 Pa durante el enfriamiento. Sin embargo, Mendez-Montealvo, *et al.* (2006) reportaron un comportamiento muy similar para el almidón de maíz crudo a las mismas temperaturas utilizadas en este estudio, aunque con una cuarta parte del volumen de muestra utilizado en este estudio; y en otro estudio reportado por Chel-Guerrero, *et al.* (2016), el almidón de maíz se comportó de forma similar respecto a la dependencia de la frecuencia, a la misma concentración de muestra que la utilizada en este estudio, pero con una fuerza mucho mayor a 95 °C, y un gel estable y casi independiente de la frecuencia a 25 °C.

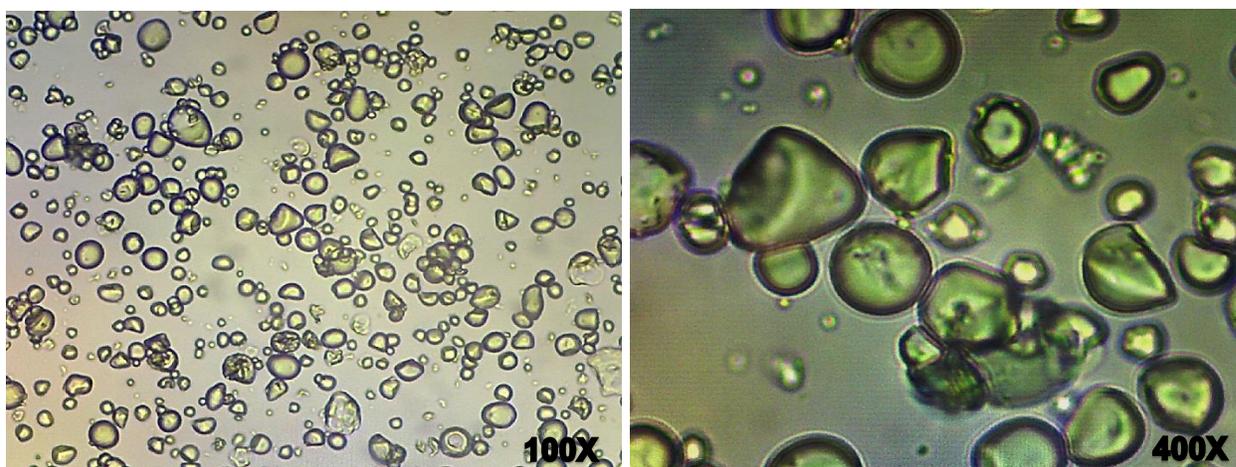
Del mismo estudio de Singh, *et al.* (2007), refirieron que las diferencias en las propiedades reológicas entre los almidones se pueden atribuir a la diferencia de tamaño y la forma de los gránulos, la presencia de ésteres de fosfato y la relación amilosa/amilopectina; además, Chel-Guerrero, *et al.* (2016) comentaron que también la concentración del almidón en el sistema es un factor importante en el comportamiento de las propiedades viscoelásticas.

#### **7.2.6. Microscopía óptica y SEM**

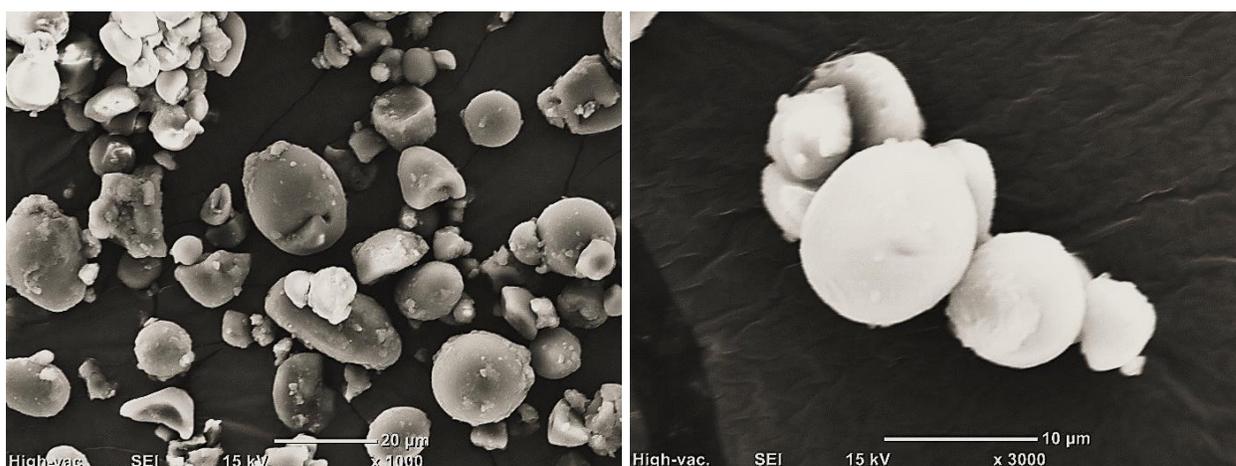
Las micrografías de los gránulos de almidón se obtuvieron por microscopía óptica (Fig. 12), y microscopía electrónica de barrido (SEM) (Fig. 13).

En ambas figuras se observaron gránulos de geometría mixta: esféricos, ovalados y lenticulares de tamaños menores a 20  $\mu\text{m}$ , parecidos a los reportados por Dreher y

Berry (1983), lo cual permitió compararlos de otras fuentes de almidón, tanto diferentes como semejantes, como la yuca (Mina, *et al.* 2009), un tubérculo donde los gránulos son predominantemente esféricos, o los de la papa (Acosta, *et al.* 2006), otro tubérculo donde, de forma nativa, son predominantemente ovoides, aunque de mayor tamaño. Otros tubérculos menos conocidos, como el makal, el camote y el sagú (Hernández-Medina, *et al.* 2008) o el ocumo (Palomino, *et al.* 2010), presentaron geometrías desde semiesféricas hasta poliédricas.



**Figura 12.** Micrografía del almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) a 100X y 400X.



**Figura 13.** Micrografías de gránulos de almidón de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* HBK) bajo el microscopio electrónico, observada a 1000X y 3000X

Algunos de los gránulos de almidón de raíz de calabacilla loca se notaron fracturados, posiblemente debido al efecto de cizallamiento ocurrido durante el proceso de obtención. También, en la Figura 12, se distinguieron algunos signos de birrefringencia en los gránulos de almidón de raíz de calabacilla loca, atribuido al grado de cristalinidad en la estructura del mismo, según es referido por Díaz-Barrera (2015).

### **7.3. Posibles aplicaciones**

De acuerdo a las características evaluadas en el almidón de raíz de calabacilla loca, dentro del ramo de la industria alimenticia podría encontrar utilidad como ingrediente espesante y/o estabilizante en alimentos cuyo proceso de elaboración no incluya valores de temperatura más alta que la de la gelatinización del almidón estudiado, tales como pudines, dulces suaves como las natillas (Hernández-Medina, *et al.* 2008), yogurt, entre otros; o bien, en alimentos donde la sinéresis no sea un problema tecnológico importante debido al alto contenido de agua en ellos, como es el caso de algunas salsas.

También podría encontrar un nicho de utilidad como agente ligante en algunos productos cárnicos cocidos, debido a su alto poder de hinchamiento.

Como una alternativa a la búsqueda de nuevas aplicaciones para esta materia prima de fuente no convencional, podría someterse a uno o varios procesos de modificación a fin de mejorar sus propiedades estructurales y dirigirla hacia tecnologías incluso fuera del ámbito de aplicación en la industria alimenticia, como la elaboración de películas biodegradables e incluso comestibles, opción que necesita ser explorada.

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se ha concluido con el estudio, los resultados que se obtuvieron hacen posible que se concluya lo siguiente:

- Se logró obtener almidón de la fuente no convencional conocida como raíz de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK) con una pureza de alrededor del 93% al finalizar el proceso de purificación.
- Las características bromatológicas del material resultaron ser similares a algunos almidones de diferentes fuentes, y distinto a otras, sobre todo comparada con otros tubérculos y raíces tuberosas.
- Las características morfológicas del gránulo se comparten con otros almidones de raíces tuberosas diferentes a la papa y la yuca, y también presentan diferencias con almidones de otras fuentes botánicas, como los frutos y los cereales.
- Se confirmó la composición cualitativa del almidón a través del espectro FTIR resultante.
- La caracterización por DSC reveló un material con temperatura de gelatinización hacia los 66 °C, muy parecida a la de otros almidones, junto con su entalpía de gelificación, aunque no tan parecida a la de la mayoría de almidones comerciales, respecto a los cuales el material aquí estudiado presentó valores menores.
- Los valores de la caracterización reológica revelan un almidón con capacidad de formación de geles más débiles que los de los almidones de otros tubérculos, como la papa, aunque estables en cierto rango de temperatura, lo que permitiría

utilizarlos en la elaboración de alimentos donde las temperaturas de procesamiento no sean tan extremas.

Como recomendaciones se consideraron las siguientes:

- Es necesario completar la caracterización de este almidón a través de otros estudios, como la difracción de rayos X, análisis termogravimétrico (TGA), determinación de sinéresis, cuantificación de amilosa/amilopectina, así como la determinación de la distribución de tamaño de partícula.
- Se sugiere también la realización de un estudio donde se lleve a cabo una modificación de este material, por ejemplo una oxidación, con la finalidad de mejorar sus propiedades funcionales, y así investigar y desarrollar otras aplicaciones tecnológicas, no necesariamente relacionadas con el área de alimentos.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H. A.; Villada, H. S.; Torres, G. A. y Ramírez, J. G. (2006) Morfología superficial de almidones termoplásticos agrio de yucca y nativo de papa por microscopía óptica y de fuerza atómica. *Información tecnológica* 17(3):63 – 70
- Araneda, M. (2015). Hidratos de carbono (carbohidratos). Características y propiedades (parte 1). Edualimentaria.com: educación en alimentación y nutrición. Disponible el 23 de enero de 2018 en: <http://www.edualimentaria.com/hidratos-de-carbono-caracteristicas-propiedades/parte1>
- Arroz.com. (2016). Estimaciones de la FAO de la producción y comercio mundial de arroz. Disponible el 09 de mayo de 2017 en: <http://arroz.com/tags/consumo>
- Bello Pérez, L. A.; Aparicio Saguilán, A.; Méndez Montealvo, G.; Solorza Feria, J. & Flores Huicochea, E. (2005) Isolation and partial characterization of mago (*Mangifera indica* L.) starch: morphological, physicochemical and functional studies. *Plant Foods For Human Nutrition* 60(2005):7–12 DOI: 10.1007/s11130-005-2534-z
- Bello Pérez, L. A.; González Soto, R. A.; Sánchez Rivero, M. M.; Gutiérrez Meraz, F. & Vargas Torres, A. (2006). Extrusión de almidones de fuentes no convencionales para la producción de almidón resistente. *Agrociencia* 40(2006): 441-448
- Bello Pérez, L. A.; Contreras Ramos, S. M.; Romero Manilla, R.; Solorza Feria, J. & Jiménez Aparicio, A. (2002) Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano (*Musa paradisiaca* L. var. macho). *Agrociencia*. 36(2002):169 – 180
- Brunel, J. (2016). El impacto del ultrasonido en las propiedades del almidón. Food News Latam.com: Noticias diarias de la industria de alimentos y bebidas América Latina. Disponible el 23 de enero de 2018 en: <http://foodnewslatam.com/paises/85-mexico/6294-el-impacto-del-ultrasonido-sobre-las-propiedades-del-almid%C3%B3n.html>

- Casarrubias Castillo, M. G.; Méndez Montealvo, G.; Rodríguez Ambriz, S. L.; Sánchez Rivera, S. L. y Bello Pérez, L. A. (2012) Diferencias esctrucurales y reológicas entre almidones de frutas y cereales. *Agrociencia* 46:455 – 466
- Castro-Pacheco, K. (2010). Carbohidratos energéticos, almidón como carbohidrato energético. Disponible en línea el 25 de enero de 2018 en: [http://carbohidratosenergeticos.blogspot.mx/2010/08/almidon-como-carbohidrato-energetico\\_08.html](http://carbohidratosenergeticos.blogspot.mx/2010/08/almidon-como-carbohidrato-energetico_08.html)
- Chel Guerrero, L.; Barbosa Martín, E.; Martínez Antonio, A.; González Mondragón, E. & Betancur Ancona, D. (2016) Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. *International Journal of Biological Macromolecules* 86(2016):302–308  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.052>
- Chi, H; Xu, K.; Xue, D.; Song, C.; Zhang, W. y Wang, P. (2007) Synthesis of dodecenyl succinic anhydride (DDSA) corn starch; *Food Research Int.* 40: 232-238
- Copeland, L.; Blazek, J.; Salman, H. & Tang, M. Ch. (2009) Form and functionality of starch. *Food hydrocolloids* 23(2009):1527–1534
- Díaz Barrera, Y. (2015) Determinación de las propiedades físicas, químicas, tecno funcionales y la estabilidad en congelación/descongelación del almidón de cuatro variedades de *Solanum tuberosum ssp. andigenum* (papa nativa). Tesis profesional. Universidad Nacional José María Arguedas. Andahuaylas, Perú.
- Donald, A. M. (2004). Understanding Starch Structure and Functionality. Cap. 5 in *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Por Ann-Charlotte Eliasson, CRC Press. Cambridge, England.
- Dreher, M. L. & Berry, J. W. (1983) Buffalo gourd root starch. Part I. Properties and structure. *Starch/Stärke* 35(3):76 – 81
- Enríquez C., M.; Velasco M., R.; Fernández Q., A. (2013) Caracterización de almidones de yuca nativos y modificados para la elaboración de empaques biodegradables.

- Espinosa Solís, V. (2009). Estudios estructurales de almidón de fuentes no convencionales: Mango (*Magnifera indica L.*) y plátano (*Musa paradisiaca L.*). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Morelos, México.
- Fanelli, B. (2018). Almidón. Área química: química de alimentos. Universidad Nacional de Quilmes. Disponible el 23 de enero de 2018 en: <https://es.scribd.com/document/75171731/02-Almidon>
- Gómez López, P. (2013) Obtención de productos directamente expandidos por extrusión y botanas de 3ª generación a base de chía y almidón de maíz resistente AR4. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México.
- Guízar Miranda, A. (2009) Obtención y caracterización física y química del almidón de “camote de cerro” (*Dioscorea ssp.*). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Michoacán, México.
- Hernández Medina, M.; Torruco Uco, J. G.; Chel Guerrero, L. y Betancur Ancona, D. (2008) Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia Alimentaria, Campinas*, 28(3):718 – 726
- Hui, R.; Chen Qi-he; Fu Ming-liang; Xu Qiong; He Guo-qing (2009). Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified potato starch. *Food Chemistry* 114(1): 81 – 86. doi:10.1016/j.foodchem.2008.09.019
- Hsu, S.; Lu, S. & Huang, C. (2000) Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization. *Journal of Food Science*, 65:215 – 220
- Juliano, B. O. (1994). El arroz en la nutrición humana. Colección FAO: alimentación y nutrición. Roma, Italia. p. 131
- Lira Saade, R. (2001) *Cucurbitaceae*. Flora del bajío y regiones adyacentes. Fascículo 92. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. Pp. 20 – 23

- Lira R. et al. (2002). Ethnobotany of the Wild Mexican Cucurbitaceae. *Economic Botany*. 56(4):380 - 398
- Lira-Saade, R.; Eguiarte-Frutos, L. y Montes-Hernández, S (2009) *Proyecto recopilación y análisis de la información existente de los géneros Cucurbita y Sechium que crecen y/o se cultivan en México*. Informe final. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. Pp. 21 – 23
- Loaiza J. K. y Larrahondo, J. E. (2017). Evaluación del contenido de amilosa en arroz mediante espectroscopia de infrarrojo cercano-NIRS. *Archivos Latinoamericanos de nutrición* 67(1):56 – 61
- López Cazarez, Y. E. (2009) Producción de bioetanol a partir de residuos almidonosos en un sistema de fermentación con *Zymomonas mobilis* inmovilizada. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Mano, J. E., D. Koniarova, and R. L. Reis (2003). Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. *Journal of Materials Science—Mater. M.* 14: 127–135.
- Manrique Quevedo, N.; González Soto, R. A.; Othman Abu-Hardan, M.; García Suárez, F. J. & Bello Pérez, L. A. (2007). Caracterización de mezclas de almidones de mango y plátano pre gelatinizados mediante diferentes condiciones de extrusión. *Agrociencia* 41:637 – 645
- Marínn Herbert, E. (2013) Extracción, caracterización y modificación de almidón de plátano (*Musa sapientum*) variedad Roatán, producto de desecho post-cosecha de la zona de vega de Alatorre, Veracruz. Tesis profesional. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- Medina J. A. y Salas J. C. (2008). Caracterización morfológica del granulo de almidón nativo: Apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de ingeniería*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 27:56 – 62

- Melaragno, J. (2011). Buffalo gourd. Deer canyon folks.org: a virtual home for Deer canyon preserve property owners. Disponible el 23 de enero de 2018 en: <http://www.deercanyonfolks.org/flora/buffalo-gourd-june-2011.html>
- Méndez Montealvo, G., Sánchez-Rivera M. M., Paredes-López O., Bello-Pérez, L. A. (2006). Thermal and rheological properties of nixtamalized maize starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. 40(2006): 59–63
- Méndez Sanchez, A. F.; Pérez Trejo, L. y Paniagua Mercado, A. M. (2010) Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin America Journal of Physic Education* 4(1):237 – 245
- Mina, J. H.; Valadez, A.; Herrera-Franco, P. J. y Toledano, T. (2009) Influencia del tiempo de almacenamiento en las propiedades estructurales de un almidón termoplástico de yuca (TPS). *Ingeniería y competitividad* 11(2):1 – 26
- Moorty, S. N. (2002) Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: a review. *Starch/Stärke* 54:559 – 592
- Narváez-González, E. D.; Figueroa-Cárdenas, J. D.; Taba, S.; Castaño Tostado, E. y Martínez Peniche, R. A. (2007) Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de pastificado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 269 – 277
- Palomino, C.; Molina, Y. y Pérez, E. (2010) Atributos físicos y composición química de harinas y almidones de los tubérculos de *Colocasia esculenta* (L.) Schott y *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott. *Revista de la Facultad de Agronomía (UCV)* 36(2):58 – 66
- Pardo, O. H.; Castañeda, J. C. y Ortiz, C. A. (2013) Caracterización estructural y térmica de almidones provenientes de diferentes variedades de papa. *Acta agronómica* 62(4):289 – 295
- Paredes-López, O., Bello-Pérez, L. A. y López, M. G. (1994). Amylopectin: Structural, gelatinisation and retrogradation studies. *Food Chemistry* 50: 411- 417
- Poot-Matu, J. E.; Centurión-Hidalgo, D.; Espinosa-Moreno, J.; Cázares-Camero, J. G. y Mijangos-cortés, M. A. (2002). Rescate e identificación de raíces y tubérculos tropicales subexplotados del estado de Tabasco, México. *Etnobiología* 2: 59 -73

- Reddy, I. & Sieb, P. A. (2000) Modified waxy wheat starch compared to modified waxy corn starch. *Journal of cereal science*, 31:25 – 39
- Rivera Andrade, E. (2017). Extracción y caracterización parcial de almidón de una fuente no convencional: raíz de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK). Tesis de ingeniería. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Royo Márquez, M.; Memlgoza Castillo, A. y Sierra Tristán J. S. (2003). *Manual de plantas útiles*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chihuahua, Chih., México.
- Sandoval Aldana, A.; Rodríguez Sandoval, E. y Fernández Quintero, A. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Dyna* 72(146):45 – 53
- Schwall G. P.; Safford, R.; Westcott, R. J.; Jeffcoat, R.; Tayal, A.; Shi, Y. C.; Gidley, M. J. & Jobling, S. A. (2000). Production of very-high-amylose potato starch by inhibition of SBE A and B. *Nature Biotechnology* 18:551 – 554
- Seetharaman, K., Tziotis, A., Borrás, F., White, P. J., Ferrer, M., & Robutti, J. (2001) Thermal and Functional Characterization of Starch from Argentinean Corn 1. *Cereal Chemistry*, 78(4): 379-386
- Singh, J.; McCarthy, O. J.; Singh, H.; Moughan, P. J. & Kaur, L. (2007) Morphological, thermal and rheological characterization of starch isolated from New Zeland kamo kamo (*Cucurbita pepo*) fruit – a novel source. *Carbohydrate polymers* 67:233 – 244
- Sívoli, L.; Pérez, E. y Rodríguez, P. (2012) Análisis estructural del almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta* C.) empleando técnicas morfométricas, químicas, térmicas y reológicas. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 29:293 – 313
- Stevenson, D. G., Domoto, P. A. & Jane, J. (2006). Structures and functional properties of Apple (*Malus domestica* Borkh) fruit starch. *Carbohydrate polymers* 63(3): 432 – 441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.10.009>

- Tirado-Gallegos J. M., Zamudio-Flores P. B., Ornelas-Paz J. de J., Rios-Velasco C., Acosta-Muñiz C. H. Gutiérrez-Meraz F., Islas-Hernández J. J., Salgado-Delgado R. (2016). Efecto del método de aislamiento y el estado de madurez en las propiedades fisicoquímicas, estructurales y reológicas de almidón de manzana. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15(2): 391-408.
- Torres Becerril, M.; Carmona García, R. y Aguirre Cruz, A. (2015) Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 6(4):905 – 912
- Tovar T. (2008). Caracterización morfológica y térmica de almidón de maíz (*Zea mays* L) obtenido por diferentes métodos de aislamiento. Tesis de licenciatura. Instituto de ciencias básicas e ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Vargas-Aguilar, P. y Hernández-Villalobos, D. (2012). Harinas y almidones de yuca, ñame, camote y ñampí: propiedades funcionales y posibles aplicaciones en la industria alimentaria. *Tecnología en marcha* 26(1): 37 – 45
- Vázquez Castillo, W. A. (1993). Temperatura, fenología y calidad física en la semilla de maíz (*Zea mays* L.). Tesis de maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 99 p.
- Velíšek, J. (2014). *The Chemistry of Food*. 1<sup>st</sup> Ed. Wiley. U.S.A.
- Yúfera, E. P. (1998). *Química de los Alimentos*. Editorial Síntesis S.A. Madrid, España.
- Zamudio Flores, P. B.; Tirado Gallegos, J. M.; Monter Miranda, J. G.; Aparicio Saguilán, A.; Torruco Uco, J. G.; Salgado Delgado, R. y Bello Pérez, L. A. (2015) Digestibilidad in vitro y propiedades térmicas, morfológicas y funcionales de harinas y almidones de avena de diferentes variedades. *Revista mexicana de ingeniería química* 14(1):81 – 97
- Zhang, H., Yin L., Zheng Y., Shen J. (2016). Rheological, textural, and enzymatic hydrolysis properties of chickpea starch from a Chinese cultivar. *Food Hydrocolloids*. 54 (2016) 23-29

Zhang, P.; Whistler, R. L.; BeMiller, J. N. & Hamaker, B. R. (2005) Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility – A review. *Carbohydrate polymers* 59(2005):443 – 458 doi:10.1016/j.carbpol.2004.10.014