



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**“AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ALMIDÓN NATIVO  
DE AMARANTO”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:  
RICARDO DÍAZ HERRERA**

**ASESOR:  
DRA. ELSA GUTIERREZ CORTEZ**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO. 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## HOJA DE VOTOS APROBATORIOS

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS FAMILIA y amigos, novia, escuela, maestros



# ÍNDICE

Resumen.....	10
Introducción .....	11
1. Capítulo I Antecedentes .....	13
1.1 El amaranto .....	13
1.2 Clasificación taxonómica del amaranto .....	15
1.3 Clasificación de los tipos de amaranto.....	16
1.4 Estado geográfico actual del amaranto .....	16
1.5 Morfología del amaranto .....	17
1.6 Composición química del grano del amaranto .....	19
1.7 Almidón de amaranto .....	20
1.8 Composición química y de minerales del almidón amaranto.....	21
1.8.1 Amilosa .....	21
1.8.2 Amilopectina .....	22
1.9 Fenómenos que ocurren al almidón .....	23
1.9.1 Gelatinización .....	23
1.9.2 Pastificación .....	23
1.9.3 Retrogradación.....	23
1.10 Organización del gránulo de almidón de amaranto.....	25
1.11 Patrón de Rayos X del Almidón .....	25
1.12 Perfil típico de un viscoamilograma .....	26
1.13 Cambios morfológicos en el almidón (microscopia electrónica) .....	29
1.14 Análisis químico proximal.....	30
1.15 Aplicaciones del almidón.....	30
1.16 Aislamiento del almidón (Separación mecánica por centrifugación de suspensiones de almidón): .....	31
1.17 Almidones modificados.....	32
1.18 Modificación física.....	32
1.19 Modificación química .....	33
2. Capítulo II Metodología experimental (Técnicas para separar e identificar).....	34
Problema: .....	34
Objetivo general:.....	34
2.1 Objetivos particulares: .....	34

2.2	Desarrollo Experimental.....	34
2.3	Actividades experimentales .....	36
2.3.1	Materia prima y su acondicionamiento .....	36
2.3.2	Diagrama de bloques del proceso de separación de almidón de amaranto. ....	37
2.3.3	Separación del almidón en una centrifuga de discos (Objetivo 1).....	39
2.4	Eficiencia de separación .....	40
2.5	Rendimiento .....	41
2.6	Análisis estadístico. ....	42
2.7	Análisis químico proximal del almidón nativo (Objetivo 2). ....	43
2.8	Determinación de minerales del almidón nativo .....	43
2.9	Determinar la gelatinización del almidón nativo .....	45
2.9.1	Neutralización de la suspensión.....	45
2.9.2	Centrifugación de la suspensión neutralizada .....	46
2.10	Caracterización fisicoquímica de almidón.....	47
2.10.1	Determinación del perfil viscoamilográfico .....	47
2.10.2	Difracción de Rayos X .....	48
3.	Capitulo III Resultados y análisis .....	50
	Actividades experimentales .....	50
3.1	Materia prima y su acondicionamiento. ....	50
3.2	Diagrama de bloques del proceso de extracción de almidón nativo de amaranto. ....	50
3.3	Separación del almidón en una centrifuga de discos (Objetivo 1).....	50
3.3.1	Resultados de eficiencia de separación. ....	50
3.3.2	Rendimiento en almidón.....	52
3.4	Análisis estadístico. ....	53
3.4.1	Turbidez de la fase pesada .....	53
3.4.2	Eficiencia de separación .....	54
3.4.3	Estadístico del rendimiento.....	55
3.5	Resultados del análisis químico proximal de la harina de amaranto y del almidón de amaranto nativo mediante las técnicas de AOAC para obtener el porcentaje de su composición. 56	
3.6	Caracterización fisicoquímica de los almidones nativo.....	58
3.6.1	Resultados del perfil viscoamilográfico (Rehómetro con celda del almidón).....	58

3.6.2	Resultados en fenómeno de gelatinización del almidón nativo, mediante calorimetría diferencial de barrido para establecer el intervalo de temperaturas donde ocurre.	60
3.6.3	Resultados de difracción de rayos X. (Difractómetro de Rayos X).....	62
Conclusiones .....		64
Referencias Bibliográficas .....		65



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Planta de Amaranto.....	14
Figura 2 Corte longitudinal de una semilla de amaranto. (Tinción hematoxilina-eosina, 400x). Ref: Co: cotiledones, Pe: perispermo almidones, Pr: procambium, Te: tegumento, E: embrión. ....	17
Figura 3 Corte transversal de una semilla de amaranto. (Tinción hematoxilina-eosina, 400x) Co: cotiledones, Pe: perisperma, Pr: procambium, Te: tegumento, Ra: raíz. ....	18
Figura 4 Estructura monomérica de la amilosa .....	22
Figura 5 Estructura monomérica de la amilopectina. ....	22
Figura 6 Representación esquemática de la de formación de pasta del almidón.....	24
Figura 7 Patrones de difracción de rayos X: A, B, C y V .....	26
Figura 8 Perfil de viscosidad aparente.....	28
Figura 9 Cuadro metodológico del desarrollo experimental .....	35
Figura 10 Granos de Amaranto Nativo .....	36
Figura 11 Diagrama de bloques de separación de almidón de amaranto nativo.....	37
Figura 12 Solución de NaOH con amaranto nativo .....	38
Figura 13 Molienda húmeda y tamizado del amaranto húmedo, a) molienda, b) colado, c) tamizado. ....	38
Figura 14 Separación mecánica del almidón de amaranto nativo, a) armado de la centrifuga, b) llenado del tanque, c) separación mecánica del almidón de amaranto. ....	39
Figura 15 Determinación de la Turbidez, a) turbidímetro Hanna Instruments, modelo LP 2000, b) lecturas de líquido de la fase ligera. ....	40
Figura 16 Separación mecánica de almidón de amaranto, a) recolección de almidón del tazón, b) recuperación de los discos, c) eliminación de agua por arrastre de aire, d) almidón seco. ....	41
Figura 17 Determinación de minerales, a) Carrusel con vasos, b) digestor en microondas. ....	44
Figura 18 Suspensión en agitación y con bureta incorporada .....	45
Figura 19 Medición de pH a) Potenciómetro Jenco Electronics, LTD, Mod. 6071, b) medición del pH de la suspensión. ....	46
Figura 20 Centrifugación del almidón modificado. ....	46
Figura 21 Almidón con tratamiento ácido de amaranto.....	47
Figura 22 Prueba de viscosidad en celda de almidón a) Reómetro Anton Paar MCR 102, b) impulsor del reómetro .....	47
Figura 23 Determinación de Rayos X a) Porta muestra para Rayos X. b) Difractómetro de Rayos X.....	48
Figura 24 Eficiencia de separación para cada corrida experimental del almidón .....	51
Figura 25 Rendimiento para cada corrida experimental del almidón.....	52
Figura 26 Gráficas del estadístico de turbidez, a) gráfica de efectos principales de Turbidez en la fase pesada, b) de interacciones entre la velocidad de giro y el tornillo de gravedad. ....	53
Figura 27 Gráficas del estadístico de eficiencia, a) gráfica de efectos principales de eficiencia en la fase pesada, b) de interacciones entre la velocidad de giro y el tornillo de gravedad.....	54

Figura 28 Gráficas del rendimiento, a) gráfica de efectos principales del rendimiento, b) interacciones entre la velocidad de rotación y el tornillo de gravedad. ....	55
Figura 29 Perfil viscoamilografico del almidón nativo.....	59
Figura 30 Termograma del almidón nativo de amaranto .....	61
Figura 31 Difractograma de Rayos X para el almidón aislado nativo de amaranto.....	62

### **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Taxonomía del Amaranto.....	15
Tabla 2 Producción nacional de Amaranto .....	16
Tabla 3 Composición química de la semilla de amaranto (por 100 g de parte comestible y en base seca).....	19
Tabla 4 Comparativa de la composición química de la semilla de amaranto.....	20
Tabla 5 Variables independientes.....	42
Tabla 6 Resultados de la turbidez de la fase pesada de la separación mecánica por centrifugación.....	50
Tabla 7 composición química de la harina de amaranto nativo .....	56
Tabla 8 contenido de minerales del almidón nativo .....	57

## Resumen

Hoy en día se busca el aislamiento de almidones de nuevas fuentes que no se han estudiado, ya sean tubérculos, frutos, semillas, cereales y pseudocereales. Este trabajo desarrolló una investigación sobre la separación o aislamiento del almidón de amaranto, con el propósito de caracterizarlo fisicoquímicamente y conocer como puede ser aplicado en la industria de los alimentos. La separación mecánica en una centrifuga de discos permitió obtener un almidón con alta eficiencia de separación, casi libre de grasa y proteínas con muy alto rendimiento. Este almidón fue caracterizado con el análisis químico proximal, con identificación y cuantificación de sus minerales por la metodología de espectroscopia de absorción atómica con diferentes lámparas de cátodo hueco para identificar varios analitos. La gelatinización del almidón se obtuvo mediante una triada de técnicas que se pueden fácilmente correlacionar; Calorimetría diferencial de barrido (DSC), reómetro con celda de almidones y por difracción de rayos x para identificar sus patrones. Los almidones son utilizados como aditivos e ingredientes funcionales en el procesamiento de los alimentos. El almidón aislado de amaranto resulto rico en calcio, fósforo, magnesio entre otros minerales, lo que lo hace muy atractivo en aspectos nutrimentales. Además, es de bajo costo, biodegradable y de naturaleza abundante ya que en México se produce y se cultiva el amaranto. También le dará un valor agregado al amaranto. Este almidón va a permitir tener aplicaciones para consistencia, poder aglutinante, estabilidad, cambios de pH, temperatura mejor su gelificación, dispersión, fluidez entre otras propiedades funcionales. La gelatinización de este tipo de almidón está por debajo de muchos almidones de acuerdo con lo reportado por el análisis de DSC, perfil máximo de viscosidad por el reómetro con celdas de almidón y por difracción de rayos X. Este conocimiento de su caracterización permitirá hacer modificaciones al almidón de amaranto nativo de acuerdo con las necesidades que se deseen lograr con almidones modificados.

**Palabras clave:** *Almidón, amaranto, centrifugación, gelatinización, minerales.*

## Introducción

Mundialmente, la industria del almidón está limitada a unos cultivos tradicionales, como maíz, papa, trigo y arroz. Desde hace algún tiempo se ha estudiado la incorporación de materias primas no convencionales, provenientes de tubérculos y frutos, pseudocereales que sean de importancia comercial y nutricional lo que hace que se busquen fuentes alternas como mafafa, mango, yuca, malanga, yaka, mangosten, amaranto, entre otros para el aislamiento de este biopolímero y satisfacer la necesidad del sector industrial (Rendón et al., 2010). Por otro lado, el pseudocereal de amaranto es uno de los 36 cultivos alimenticios más prometedores del mundo según la US National Academy of Science (Konishi y Yoshimoto, 1989), teniendo un gran potencial para convertirse en una fuente de proteínas y de almidón. El incremento del uso de polisacáridos naturales y modificados ha resultado en un creciente interés en el almidón debido a su excelente biodegradabilidad, es de bajo costo y naturaleza abundante (Silva-Sánchez et al., 2008). El almidón, es el polisacárido de reserva en las plantas. Está formado por dos familias de macromoléculas, amilosa y amilopectina que difieren en la estructura molecular, propiedades físicas y biológicas (Conn et al., 2000). Los almidones son utilizados como aditivos e ingredientes funcionales en el procesamiento de los alimentos (Trejo et al., 2010). Sin embargo, presentan ciertas limitaciones para su uso industrial debido a las condiciones de proceso como temperatura, pH y presión con los que son obtenidos. Por lo tanto, son modificados para mejorar sus propiedades funcionales y tener un amplio rango de aplicaciones (Bello et al., 2002). Los productos resultantes son, consecuentemente, productos de mayor valor agregado permitiendo realzar o inhibir propiedades como; consistencia, poder aglutinante, estabilidad a cambios en el pH y temperatura, mejoran su gelificación, dispersión, fluidez entre otros (Aristizábal et al., 2007).

El almidón es el principal componente de la semilla de amaranto y se almacena en el perispermo, es el tipo glutinoso y ceroso y está compuesto por una fracción lineal, amilosa (2-5 %) y por una fracción ramificada, amilopectina (95-98 %). La amilosa es el componente que contribuye a las características de gelación o retrogradación, mientras que la amilopectina es la fracción no gelificante que contribuye la

viscosidad. Sin embargo, las industrias alimentaria, farmacéutica y química tienen necesidades diferentes en las que los almidones juegan un papel crucial en varias aplicaciones porque sus propiedades térmicas, de pastificación, reológicas, mecánicas y estructurales determinan sus usos. Los gránulos de almidón son micropartículas formadas por amilosa, amilopectina, grasa, proteína, minerales, agua y estructuras cristalinas hexagonales y / u ortorrómbicas de D-glucopiranosilo. Cada uno de estos componentes juega un papel fundamental tanto en sus propiedades como en los productos a base de almidón. Se pueden cambiar las propiedades, pero se requieren estudios detallados al almidón nativo y modificado (Gutiérrez-Cortez et al., 2021).

La metodología propuesta para este trabajo consistió en la separación mecánica del almidón nativo por medio de la molienda húmeda del amaranto. El aislamiento se llevó a cabo en una centrífuga de discos a diferentes condiciones de operación y alimentación constante, posteriormente se eliminó el agua mediante un secado, se realizó la molienda seca y tamizado para obtener sólidos granulares de almidón de amaranto. Se calculó la eficiencia de separación y el rendimiento del almidón a las distintas condiciones trabajadas, La caracterización del almidón se realizó mediante técnicas como; Análisis químico proximal, contenido de minerales por espectroscopia de absorción atómica, gelatinización del almidón por calorimetría diferencial de barrido.

## 1. Capítulo I Antecedentes

### 1.1 El amaranto

El amaranto es un pseudocereal de origen americano que fue cultivado por las antiguas civilizaciones Mesoamericanas. Se empleaba en la dieta básica de los aztecas junto con el maíz y el frijol, tenía gran importancia económica. A la llegada de los españoles el cultivo de amaranto fue prohibido debido a que se asociaba a cultos religiosos; dando como resultado que el amaranto pasara a ser un cultivo subutilizado. En 1979, la Academia Nacional de Ciencias y la FAO propusieron que, debido a su alta calidad nutricional, amaranto podría ser un grano con gran potencial para su explotación comercial.

El amaranto es una planta C4 y una de las pocas dicotiledóneas en las cuales el primer producto de fotosíntesis es un producto de cuatro carbonos. La combinación de características anatómicas y el metabolismo C4, da como resultado un incremento de la eficiencia del uso del CO<sub>2</sub> bajo una amplia variación de temperaturas y humedad que le permiten una mejor adaptación, considerándose un cultivo alternativo en lugares donde cereales y otros cultivos de interés comercial no pueden crecer. Este cultivo se puede aprovechar de manera más eficiente puesto que ofrece tanto granos y hojas comestibles con alta calidad nutricional. Las semillas de amaranto tienen un alto contenido de proteína (13-18 %) y su composición de aminoácidos es cercana al balance óptimo requerido en la dieta humana. Las hojas también contienen niveles altos de proteína (28 a 49 %), grasas insaturadas (45 % de ácido linoleico), fibra (11 a 23 %) y minerales como hierro, magnesio, potasio, fósforo y calcio (Gutiérrez- Cortez et al., 2021). La Figura 1 muestra una fotografía de la planta de amaranto.

El amaranto es un alimento funcional que puede aportar muchos beneficios a la salud y además puede explotarse comercialmente como un producto de alto valor agregado. Aunque el amaranto es un cultivo de origen mesoamericano, actualmente se encuentra distribuido en todo el mundo. Los primeros reportes de amaranto en Europa datan de los años 1600, éste fue llevado como parte de las pruebas de la

conquista del nuevo mundo y eran principalmente plantas de ornato. Hay algunos reportes de que el amaranto fue cultivado por primera vez en Nepal y en África del este por los años 1700 y su cultivo fue extendido a Asia media y Asia oriental.



**Figura 1 Planta de Amaranto**

En la Figura 1 se puede observar la planta monoica. Los tallos alcanzan un tamaño de 30-250 cm de largo, erectos o ascendentes, glabros o escasamente a moderadamente pubescentes y hacia la punta con poco visibles, pelos multicelulares, desarmados. Hojas largo-pecioladas. Láminas foliares de 2-15 cm de largo, lanceoladas a ovadas o elípticas, estrechas o se reduce a una punta brusca o raramente con puntas romas, estrechas o cónicas en la base, las superficies glabras o la superficie inferior escasamente pubescente. Las inflorescencias por lo general de color rojo o amarillo, verde brillante en su mayoría, con menos frecuencia, axilar y terminales, las inflorescencias axilares en espigas, la inflorescencia terminal generalmente en una panícula con espigas densas. Brácteas 2.6-3.4 mm de largo, casi tan largas como los frutos (Álvarez et al., 2010).

## 1.2 Clasificación taxonómica del amaranto

El género *Amaranthus* está clasificado en la familia *Amaranthaceae*, dentro de la cual se adscribe a la subfamilia *Amaranthoideae*, en la tribu *Amaranthae* y la subtribu *Amaranthinae*.

La organización más reciente del género fue propuesta por Mosyakin y Robertson, (1996) e incluye tres subgéneros: *Acnida*, que agrupa a las especies dioicas, *Amaranthus* y *Albersia*, ambos con especies monoicas, distinguiéndose por el tipo de inflorescencia y la dehiscencia del fruto. Los dos primeros subgéneros fueron establecidos previamente por Robertson (1981) y el último fue segregado de la sección *Blitopsis* del subgénero *Amaranthus* y se presenta en la tabla 1

**Tabla 1 Taxonomía del Amaranto**

<b>Reino</b>	<b>Plantae</b>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Caryophyllidae</i>
Orden	<i>Caryophyllales</i>
Familia	<i>Amaranthaceae</i>
Subfamilia	<i>Amaranthoideae</i>
Tribu	<i>Amarantheae</i>
Género	<i>Amaranthus</i>

Fuente: CONABIO, (2014)



### 1.3 Clasificación de los tipos de amaranto

La familia *Amaranthaceae* reúne cerca de 60 géneros y más de 800 especies cuyas características cambian notablemente, dependiendo del ambiente en el que crecen, lo que dificulta la identificación de la planta. Existen tres especies de amaranto que producen semilla y que, a su vez, son las más apreciadas:

- *Amaranthus Caudatus*: se cultiva en la región de Los Andes y se comercializa como planta de ornato, principalmente en Europa y Norteamérica.
- *Amaranthus Cruentus*: es originaria de México y Centroamérica, donde se cultiva principalmente para obtener grano. También se consume como vegetal.
- *Amaranthus Hipochondriacus*: procedente de la parte central de México, se cultiva para obtener grano (Silva-Sánchez, 2008).

### 1.4 Estado geográfico actual del amaranto

Las zonas de producción y cultivo de amaranto son las mismas de la época precolombina. Como se puede observar en la tabla 2, Puebla es el mayor productor México con el 51 % de la producción nacional. Le sigue Morelos, Tlaxcala, el Distrito Federal, Edo. de México y Guanajuato con el 22, 18, 9, 6 y 2 %, respectivamente.

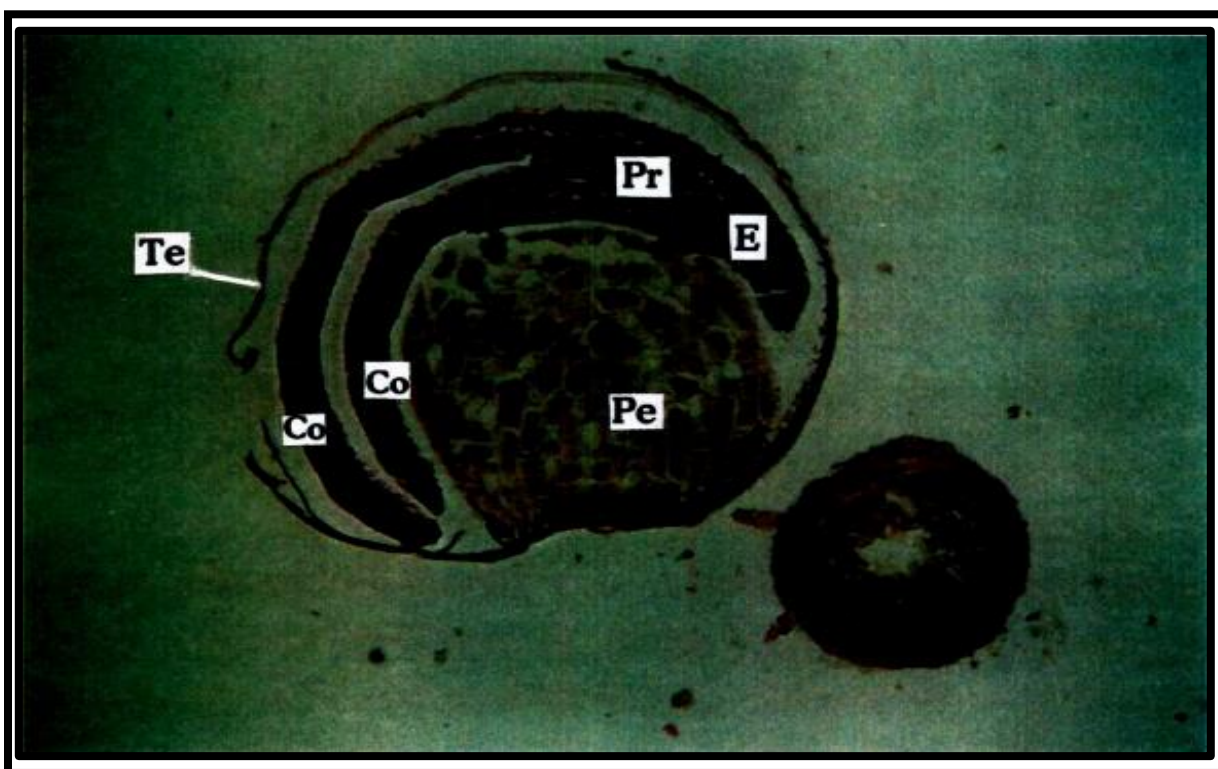
**Tabla 2 Producción nacional de Amaranto**

Entidad federativa	Superficie sembrada (Ha)	Superficie cosechada (Ha)	Producción (\$)	Rendimiento (udm/Ha)	Valor Producción (Miles de\$)
Mex/DF	122.80	122.80	139.91	1.14	3,246.81
México	373.00	373.00	871.34	2.34	9,700.57
Morelos	5.00	5.00	7.25	1.45	107.36
Oaxaca	77.05	77.05	107.91	1.40	1,428.94
Puebla	1,975	1,975.10	2,780.67	1.41	15,678.99
Tlaxcala	638.00	638.00	1,117.91	1.75	15,853.89
Total	3,190.95	3,190.95	5,024.99	1.57	46,016.46

Fuente: SIAP, (2022)

## 1.5 Morfología del amaranto

La morfología de la semilla del amaranto ha sido detalladamente descrita por Irving et al. (1981). En cortes longitudinales del grano, puede verse cómo el embrión, campilótrofo, rodea al perisperma en forma anular tal como se representa en la Figura 2. El perispermo es un tejido de depósito, constituido por células poliédricas parenquimatosas y alberga en él los gránulos de almidón, sencillos y pequeños.

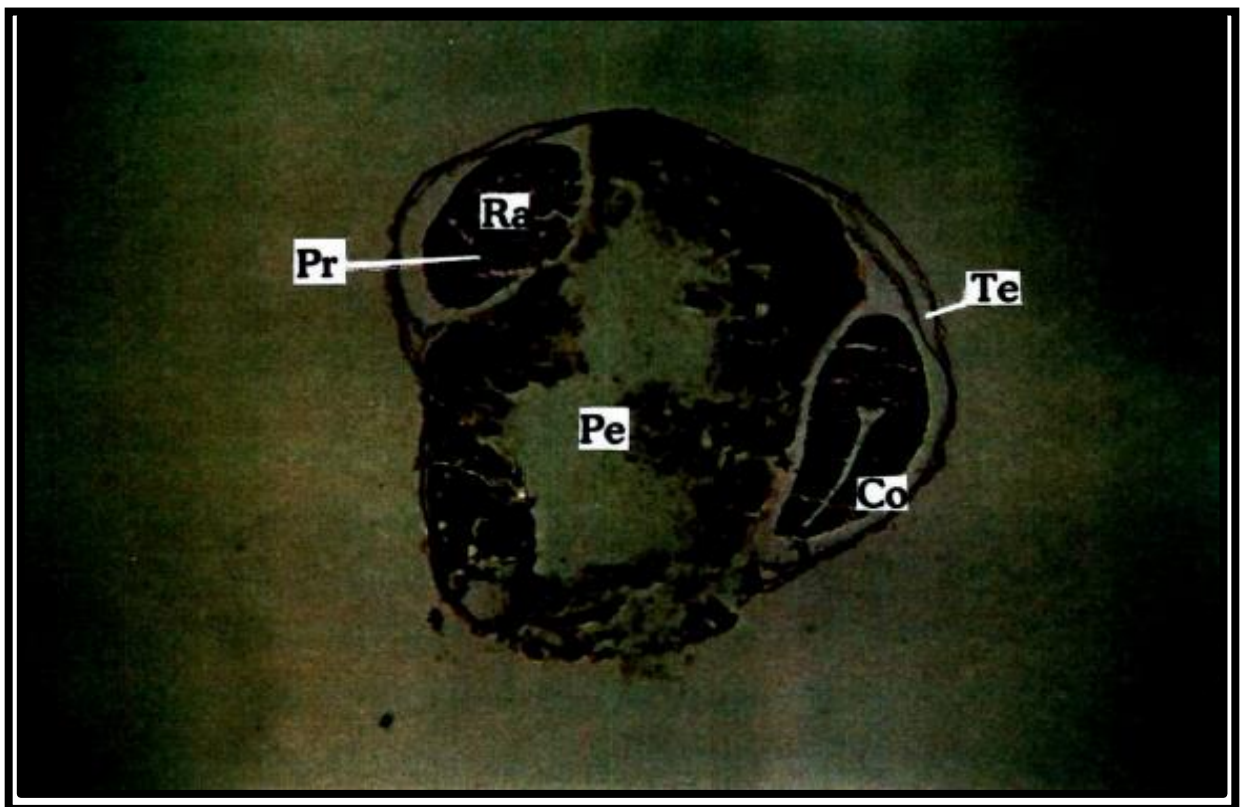


**Figura 2** Corte longitudinal de una semilla de amaranto. (Tinción hematoxilina-eosina, 400x). Ref: Co: cotiledones, Pe: perispermo almidones, Pr: procambium, Te: tegumento, E: embrión.

Por tratarse de un tejido vegetal embrionario, la futura vasculatura denominada procambium, es identificable en semilla madura bajo el aspecto de grupos celulares de pequeño diámetro en la sección transversal, tal como se muestra en la Figura 2. El procambium aparece como un único ramo en el centro de la raíz y ramas cercanas a la base del cotiledón en el hipocótilo. Si se lo secciona transversalmente, cada cotiledón exhibe una diversidad de ramos procambiales. Cuando la cubierta de la semilla y el perispermo están adyacentes, también se hallan firmemente

unidos, aunque puedan ser separados por molienda abrasiva, tal como se describe Betschart et al. (1981). La cubierta de la semilla está limitada a una única y delgada capa con una porción externa que es la que contiene el pigmento que le da coloración a la semilla.

El tejido vascular que se observa en la Figura 3 aparece cuando la semilla está adherida a la planta en el funículo y se extiende internamente hasta el perisperma. En algunas dicotiledóneas el embrión en desarrollo emplea gran parte de la energía de reserva del endospermo, lo cual hace que esta porción del grano sea pequeña al alcanzar la madurez. En el amaranto, el endospermo persiste mayormente como una capa única de células, en la región del embrión adherida a la cubierta de la semilla.



**Figura 3** Corte transversal de una semilla de amaranto. (Tinción hematoxilina-eosina, 400x) Co: cotiledones, Pe: perisperma, Pr: procambium, Te: tegumento, Ra: raíz.

En el extremo de los cotiledones y la raíz persisten varias capas celulares de endospermo. Las células parenquimatosas del embrión, de pared delgada, contienen las reservas en forma de corpúsculos proteicos de 3 a 5 u de diámetro, en tanto que el perispenna es la estructura más rica en almidón.

### 1.6 Composición química del grano del amaranto

La composición química del grano de amaranto se reporta en la tabla 3

**Tabla 3 Composición química de la semilla de amaranto (por 100 g de parte comestible y en base seca)**

<b>Componente</b>	<b>%</b>
Proteína (g)	12-19
Carbohidratos (g)	71.8
Lípidos (g)	6.1 – 8.1
Fibra (g)	3.5 – 5.0
Cenizas (g)	3.0 – 3.3
Energía (kcal)	391
Calcio (mg)	130 - 164
Fósforo (mg)	530
Potasio (mg)	800
Vitamina C (mg)	1.5

*Fuente: Matias et al. (2018)*

La tabla 3 muestra que la semilla de amaranto se caracteriza por tener un alto valor de proteínas, pero su importancia no radica en la cantidad sino en la calidad, ya que tiene un excelente balance de aminoácidos además de un aporte en grasa rica en ácidos grasos polinsaturados, sumado a esto contiene un alto valor en carbohidratos donde el almidón es el componente principal (Matías et al., 2018)

Además, en la tabla 4 se presenta un análisis comparativo con otros cereales, para conocer los aportes nutrimentales.

**Tabla 4 Comparativa de la composición química de la semilla de amaranto**

<b>Componente</b>	<b>Amaranto</b>	<b>Trigo</b>	<b>Maíz</b>	<b>Avena</b>	<b>Cebada</b>	<b>Centeno</b>
Humedad (%)	8	12.5	13.8	8.3	9.8	11
Proteína (%)	17.5	12.3	8.9	16.2	11.6	12.1
Grasa (%)	5.7	1.8	3.9	6.4	2	1.7
Fibra (%)	4.5	2.3	2	1.9	2.4	2
Cenizas (%)	3.1	1.7	1.2	1.9	2.1	1.8
Carbohidratos	61.2	69.4	70.2	65.3	72.1	71.4
Calorías	366	343	352	384	353	349

*Fuente: Robles et al. (2013)*

Robles et al. (2013) reportan que el contenido de proteína es mayor en el amaranto que es un pseudo cereal que en cualquiera de los cereales y el de fibra también es el más alto. Así mismo su contenido de minerales, de calcio, fósforo y potasio, el cual se registra en las cenizas.

### **1.7 Almidón de amaranto**

El almidón es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores, el cual es una fuente esencial de energía para el hombre (Luallen, 1988). Esta es una micropartícula, la cual está compuesta por dos macropartículas: amilosa y amilopectina. Está presente en la mayoría de las plantas y en todos los tejidos, como las hojas, las frutas, raíces, tallos y tubérculos. Los tubérculos y raíces

contienen entre un 70-80 % de agua, 16-24 % de almidón y menos del 4 % de proteínas y lípidos (Hoover, 2001).

La presión osmótica del almidón es insignificante lo cual permite a las plantas poder almacenar grandes reservas de hidratos de carbono sin perturbar las relaciones de agua de las células. En el siglo XIX demostraron que la exposición de las hojas a la luz (radiación UV) ocasiona la formación de gránulos de almidón en los cloroplastos. La desaparición de los gránulos de almidón en las hojas se demostró que se producía debido a la falta de luz o durante largos periodos de oscuridad (24-48h) (Preiss, 2008).

El almidón se acumula debido a la absorción de carbono durante la fotosíntesis. El almidón sintetizado se degrada en la oscuridad, generando productos utilizados en la síntesis de sacarosa. Por lo tanto, la biosíntesis y la degradación del almidón en las hojas es un proceso dinámico el cual depende del régimen de día-noche. El almidón en las hojas posee un contenido menor de amilosa en comparación con el almidón almacenado en los tejidos de reserva (Preiss, 2008).

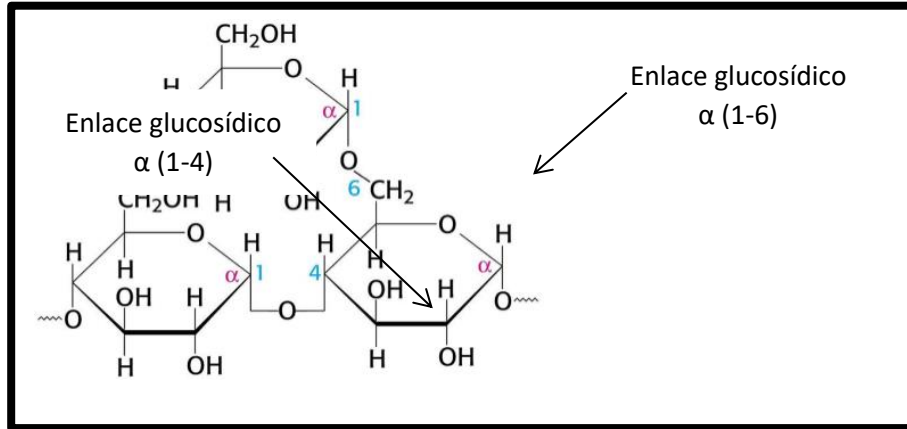
Los gránulos de almidón de amaranto son relativamente pequeños entre 1-3 micrómetros, y este tipo de almidón es un almidón ceroso, ya que tienen una baja concentración de amilosa, y esto le confiere la propiedad de ser poco viscoso y muy soluble en agua (Alagara et al., 2016).

## **1.8 Composición química y de minerales del almidón amaranto.**

### **1.8.1 Amilosa**

La amilosa consiste principalmente de residuos de D-glucanos los cuales se encuentran unidos por enlaces  $\alpha$  (1-4) en un 99 %, se considera una molécula larga y lineal, además presenta enlaces  $\alpha$  (1-6) en muy poca cantidad. La amilosa difiere en tamaño y estructura en función del origen botánico. Su peso molecular es aproximadamente  $1 \times 10^5$  -  $1 \times 10^6$  Da, el grado de polimerización (DP) por número (DP<sub>n</sub>) es de 324-4920 con alrededor 9-20 puntos de ramificación equivalente a 3-11 cadenas por molécula. Cada cadena contiene aproximadamente de 200 - 700 unidades de glucosa (Tester et al., 2004). La amilosa se despliega en forma de

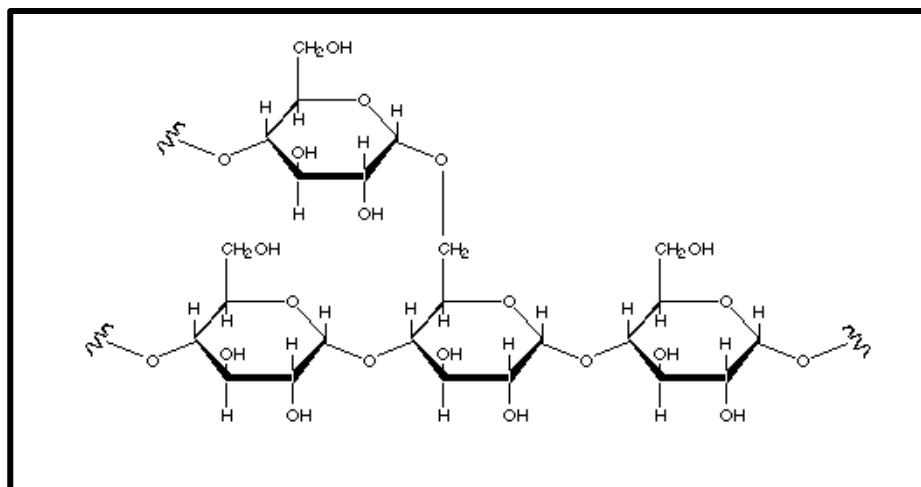
héllice cada vuelta de la hélice está formada por 6 unidades de glucosa y la hélice es estabilizada por puentes hidrógenos. La Figura 4 muestra la estructura de la molécula de amilosa



**Figura 4 Estructura monomérica de la amilosa**

### 1.8.2 Amilopectina

La amilopectina es la macromolécula ramificada del almidón. Está formada por unidades de D-glucopiranosas las cuales se unen por enlaces  $\alpha$  (1-4) pero del 5-6% de enlaces  $\alpha$  (1-6) para los puntos ramificados (Buléon et al., 1998). El peso molecular es de  $1 \times 10^7$ - $1 \times 10^9$  Da y su típico grado de polimerización por número se encuentra entre 9600-15900 (Tester et al., 2004). La Figura 5 presenta la estructura monomérica de la amilopectina.



**Figura 5 Estructura monomérica de la amilopectina.**

## **1.9 Fenómenos que ocurren al almidón**

Los fenómenos que le ocurren al almidón se presentan en la Figura 6.

### **1.9.1 Gelatinización**

Los gránulos de almidón no son solubles en agua a temperatura ambiente, debido a su estructura semi-cristalina. Cuando el almidón se encuentra con suficiente agua, los gránulos absorben una pequeña cantidad de esta y se hincha hasta cierto límite (30-50 % peso seco del almidón). Este proceso es reversible antes de que se alcance la temperatura de gelatinización. Mediante el calentamiento de los gránulos en exceso de agua y sobrepasando la temperatura de gelatinización, los gránulos de almidón pierden su orden molecular manifestándose en cambios irreversibles en las propiedades tales como: pérdida de la estructura cristalina nativa (solubilización) y pérdida de la birrefringencia (Atwell et al., 1988).

El fenómeno ocurrido es la gelatinización, el proceso endotérmico que corresponde a la disociación de las moléculas de almidón, las cuales se encuentran en una conformación con dobles hélices y pasan a una conformación amorfa (Jan et al 2013).

### **1.9.2 Pastificación**

El término “pasta de almidón” engloba varios procesos: hinchamiento del granulo, lixiviación de componentes a partir del granulo (principalmente amilosa), y eventualmente la desintegración del granulo, como es mostrado en la Figura 6 (Atwell et al., 1988).

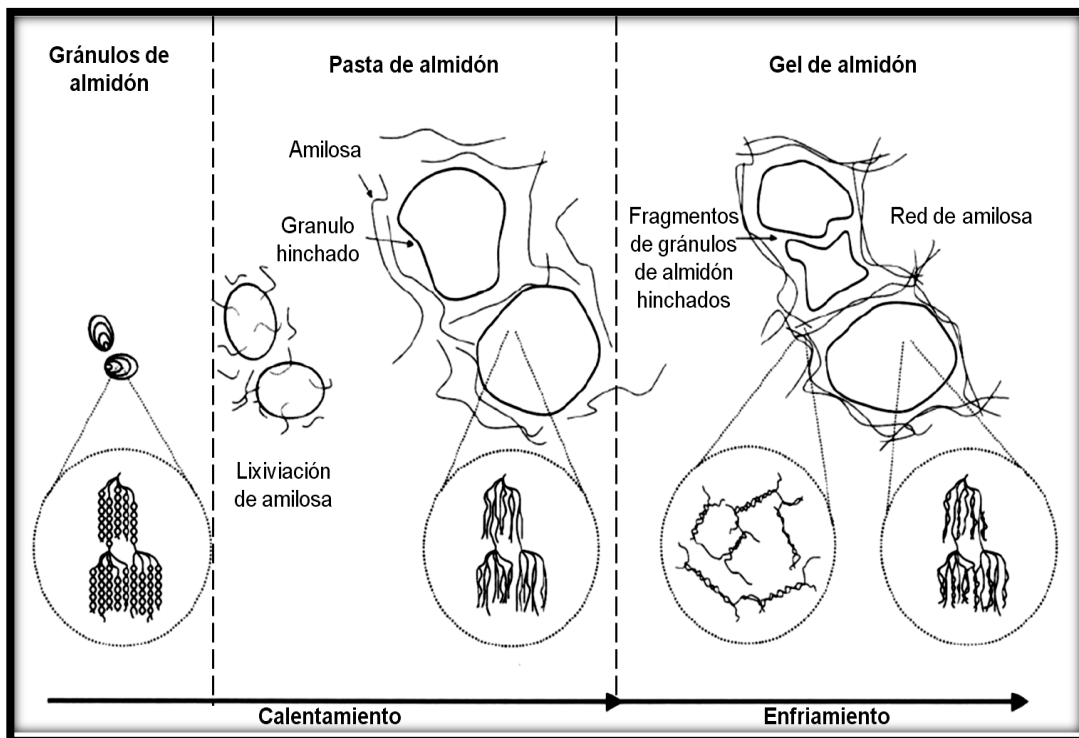
### **1.9.3 Retrogradación**

La retrogradación se presenta durante el almacenamiento prolongado de las dispersiones de almidón gelatinizado. Las moléculas de almidón, que, tras la gelatinización, se presenta en forma amorfa, gradualmente se reasocian formando cristales, que están compuestos por las dobles hélices del almidón. La formación de dobles hélices se debe a interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrogeno, las cuales se forman entre las cadenas del almidón.



Las moléculas de amilosa retrogradan mucho más rápido que las moléculas de amilopectina. La formación de dobles hélices en las moléculas de amilosa se presenta inmediatamente después de la gelatinización, por lo cual la amilosa es la responsable de los cambios reológicos iniciales de las pastas de almidón.

Por su parte, la retrogradación de la amilopectina es más lenta, y puede presentarse a lo largo de días o semanas, debido a su estructura altamente ramificada. La velocidad de retrogradación depende de varios factores como: la longitud de las cadenas de la amilopectina, de la concentración de lípidos y derivados mono éster y fosfatos (Srichuwong y Jane, 2007).



*Fuente: Srichuwong y Jane (2007)*

**Figura 6** Representación esquemática de la de formación de pasta del almidón

### **1.10 Organización del gránulo de almidón de amaranto**

En la naturaleza, la amilosa y amilopectina se encuentran formando un gránulo, estos pueden ser vistos mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), la cual es una técnica efectiva para estudiar la morfología de los gránulos. Los gránulos de almidón se producen en todas las formas y tamaños, esto depende de la fuente botánica. El tamaño de los gránulos es variable, tienen un rango aproximado de 1 a 100  $\mu\text{m}$ ; además su morfología puede ser ovalada, esférica, poliédrica e irregulares (Hoover, 2001).

Los gránulos de almidón podrían ser vistos como sistemas poliméricos parcialmente amorfos y cristalinos. El carácter cristalino de los gránulos de almidones surge por la organización de la molécula de amilopectina en el interior del gránulo mientras la amilosa constituye las regiones amorfas que se encuentran distribuidas al azar entre los racimos de la amilopectina.

La mayoría de los almidones están constituidos por anillos, los cuales se alternan entre amorfos y cristalinos, estos miden entre 100-400 nm. Estas estructuras se denominan “anillos de crecimiento”. Actualmente no se sabe mucho de las regiones amorfas de los anillos de crecimiento, sin embargo, se pueden estudiar las regiones cristalinas por medio de técnica de difracción de Rayos X (Pérez et al., 2008).

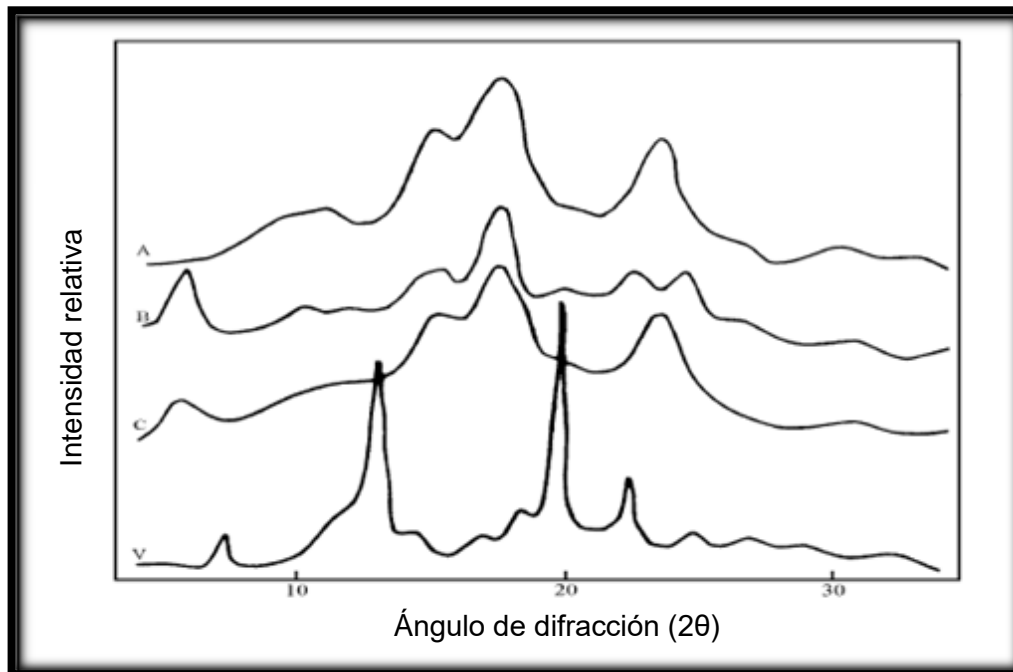
### **1.11 Patrón de Rayos X del Almidón**

Los rayos X son ondas electromagnéticas de longitudes de onda muy pequeñas entre el orden de  $10^{-9}$  y  $10^{-5}$ , invisibles al ojo humano. Al hacer llegar rayos X a una sustancia, dependiendo de su transparencia, pueden cruzar la sustancia o puede suceder el fenómeno de difracción de rayos X, que consiste en que la luz se dobla al pasar por el extremo de una superficie y no sigue la propagación de la línea recta. Los rayos X se usan en el estudio y análisis de estructuras de sustancias cristalinas, de tal manera que esta propiedad se aprovecha y se puede incluso, cuantificar los cambios en la cristalinidad del material expuesto a algún tratamiento o hablar en términos de la parte no cristalina conocida como amorfa. Es claro que distintas

estructuras producen distintos patrones de difracción de rayos X. La gráfica obtenida de cualquier material se le conoce como difractograma de rayos X.

Las pruebas de Difracción de rayos X se desarrollaron para conocer cómo cambia la microestructura de los gránulos de almidón, éste se refleja en la variación de la cristalinidad después de cocer los granos y reposarlos a diferentes tiempos.

La configuración estructural del almidón se puede estudiar a través de patrones de difracción de rayos X como se muestra en la Figura 7.



*Fuente: Rodríguez et al. (2001)*

**Figura 7 Patrones de difracción de rayos X: A, B, C y V**

### **1.12 Perfil típico de un viscoamilograma**

La pastificación, la gelatinización y la retrogradación de las dispersiones de almidón durante el calentamiento, comúnmente eran evaluados con instrumentos llamados viscoamilografos (Brabender) y analizadores rápidos de la viscosidad (ARV). Estos aparatos llevan a cabo programas de mezclado, calentamiento y enfriamiento, que generan perfiles de gelatinización y retrogradación altamente reproducibles

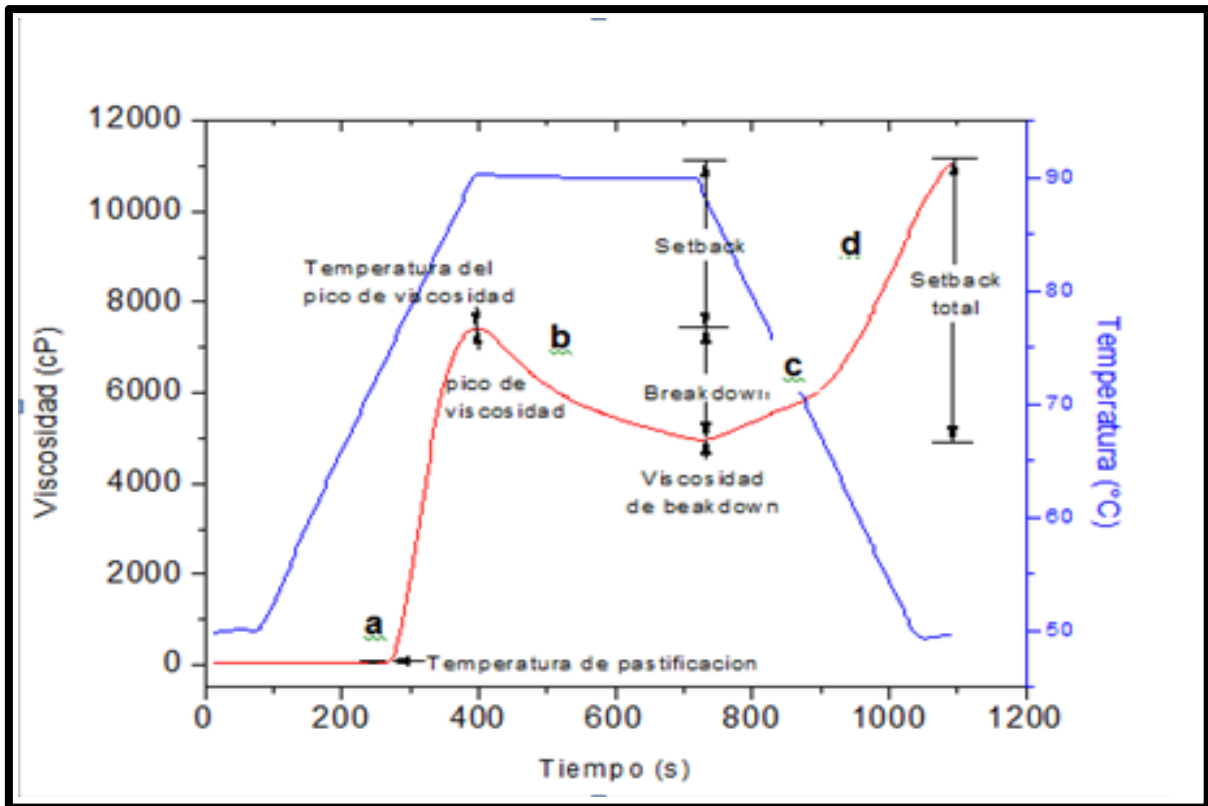
(Thomas y Atwell, 1999). Hoy se utilizan reómetros con celda de almidón para obtener el viscoamilograma.

En un típico perfil de un viscoamilograma, durante la fase inicial de calentamiento, se registra un aumento de la viscosidad aparente, como indicativo de que los gránulos de almidón comienzan a hincharse. En este punto, los polímeros con bajo peso molecular, particularmente las moléculas de amilosa comienzan a lixiviar a partir del granulo. Durante la formación de pasta, se obtiene un pico de viscosidad, lo cual representa que la mayoría de los gránulos se han hinchado. Durante el rompimiento (Breakdown), la temperatura se mantiene a 95 °C, registrándose una disminución de la viscosidad, debido al rompimiento de los gránulos hinchados, a la disociación de la amilosa y a que las moléculas de almidón continúan solubilizándose. Por último, en la fase de enfriamiento, la amilosa y la amilopectina solubilizadas empiezan a reasociarse manifestándose otro incremento en la viscosidad, el cual es conocido como la viscosidad de recuperación (set-back) (Thomas y Atwell, 1999).

El incremento de almidón dañado causado por la molienda disminuye considerablemente los perfiles de viscosidad aparente de almidones cerosos y normales. Es posible que se cause una significativa erosión de los puentes glucosídicos de cadenas largas e intermedias de amilopectina, ligando dos, tres y cuatro racimos, los cuales pueden causar una caída significativa en la tensión de corte o viscosidad aparente (Flores, 2004).

El viscoamilograma lo proporciona el equipo directamente en la pantalla de la computadora *in situ*. Al ir corriendo la muestra, se van obteniendo las diferentes partes que se encuentran en la gráfica de manera que el pico máximo de viscosidad es lo más importante. En la Figura 8 se esquematiza el fenómeno con todos los cambios que ocurren.

El punto **a** representa el tiempo en el que la muestra inicia a desarrollar viscosidad y a una temperatura de 32-55 °C y un tiempo de 170 segundos.



Fuente: Jane et al. (2013)

**Figura 8 Perfil de viscosidad aparente**

El punto **a** representa el tiempo en el que la muestra inicia a desarrollar viscosidad y a una temperatura de 32-55 °C y un tiempo de 170 segundos. El punto **b** representa el grado máximo de viscosidad aparente que desarrolla la muestra, con una temperatura de 98 °C. El punto **c** representa la desvalorización de la viscosidad en la muestra debido a la pastificación, después de que experimenta un calentamiento permanente de 90 °C, y por último el punto **d** representa la viscosidad aparente final de la muestra. El trayecto efectuado desde el punto **a** al punto **b** representa el intervalo de temperatura de gelatinización.

El pico máximo es seguido por una disminución en la viscosidad de la pasta, como la ruptura de las moléculas y los gránulos de almidón están dispersos en la fase acuosa. La velocidad y la magnitud del hinchamiento y desglose dependen del tipo y la cantidad de fécula, el gradiente de temperatura, la fuerza de cizalla y la composición de la mezcla, por ejemplo, la presencia de los lípidos y proteínas. La temperatura de gelatinización de la mayoría de los almidones está entre 60-80 °C.

En general, hay una relación negativa entre el contenido de amilosa del almidón y la viscosidad de la temperatura y el pico de gelatinización.

Como la pasta viscosa se enfría, la viscosidad aumenta debido a la formación de un gel que se mantiene unido por las interacciones intermoleculares que afectan a las moléculas de amilosa y amilopectina. En geles que contienen aproximadamente el 25 % de amilosa, las moléculas de almidón forman una red resultante en un gel firme, en contraste a los geles de almidón ceroso, que son suaves y contienen agregados, pero ninguna red. La retrogradación del almidón ha sido definida como el proceso que ocurre cuando las cadenas moleculares en los almidones gelatinizados comienzan a re-asociarse en una estructura ordenada, durante la retrogradación, la amilosa forma asociaciones de doble hélice de 40 a 70 unidades de glucosa, mientras que la cristalización de la amilopectina ocurre por una reasociación de las pequeñas ramificaciones más externas. Aunque ambas, la amilosa y la amilopectina son capaces de retrogradar, el componente de la amilopectina, aparentemente puede ser el mayor responsable (Jane et al., 2013).

### **1.13 Cambios morfológicos en el almidón (microscopia electrónica)**

El microscopio electrónico de barrido utiliza un cañón de electrones de alta energía que sistemáticamente barre la superficie de la muestra a bajo vacío; la interacción del cañón con la superficie de la muestra produce gran cantidad de señales, en que se incluyen electrones de baja energía y electrones secundarios. La baja energía de los electrones secundarios hace conveniente la colección de la señal por el barrido en el sistema detector. La señal del electrón es convertida a señal electrónica y es proyectada a un tubo de rayos catódicos y pasada a una foto multiplicador. La imagen transmitida a través de una cámara tipo televisión, en donde se observa una imagen de la superficie de la muestra con profundidad del campo.

El microscopio electrónico de barrido es un equipo muy utilizado que proporciona evidencias mediante micrografías, que se pueden obtener a diferentes aumentos a gránulos de almidón nativos y otras más para poder monitorear los cambios morfológicos que ocurren después de diferentes tratamientos a las muestras, de esta manera es posible establecer los cambios a su morfología (Arenas, 1999)

#### **1.14 Análisis químico proximal.**

El análisis químico proximal comprende la determinación de todos los componentes que constituyen un alimento, los que destacan: humedad, grasa, fibra, cenizas, carbohidratos solubles y proteína en los alimentos. Al realizar el análisis químico de matrices alimentarias se obtiene un porcentaje, la toma y tratamiento de la muestra y el método analítico seleccionado deben ser los establecidos por los métodos de la AOAC (AOAC, 2000).

#### **1.15 Aplicaciones del almidón**

El almidón ha ocupado cada vez más importancia en la industria ya que además de servir como nutriente al ser humano, se ha encontrado diversas características que, de forma natural o modificada, pueden tener diferentes aplicaciones industriales.

El amaranto se consume como grano inflado, incluido en jarabe tal como ocurre actualmente en México, En Perú la harina se emplea para la preparación" de bollos o inflados como pochoclo. La cocción en forma de guisado junto con arroz es típico de la India, en tanto que en Nepal se consume en "chapattis" que es una preparación étnica similar a un panqueque. Como puede verse, el interés sobre este cereal se ha centrado tanto en el uso del grano y de sus harinas, contándose en la actualidad con recetas para diversidad de platos, debidos a la ya mencionada ausencia de gluten y otros alergenos propios de los cereales. Sin embargo, no hay abundancia de datos en cuanto a los posibles-usos del almidón obtenido de este pseudocereal. Uno de los elementos de juicio más difundidos para evaluar los usos potenciales del mismo, radican en el pequeñísimo tamaño de los gránulos. Lo que le conferiría buenas cualidades como espesante o película comestible, además de otorgarle ventajas comparativas en su empleo como sustituto de grasas o agente de masa en alimentos de dieta. Adicionalmente, las bajas temperaturas de gelatinización y buena estabilidad a la congelación le facilitarían el uso como ingrediente en sopas, salsas y guisados (Fenema, 2000).

### **1.16 Aislamiento del almidón (Separación mecánica por centrifugación de suspensiones de almidón):**

La centrifugación es la operación mecánica que permite obtener sustancias y en el proceso de separación del almidón de maíz del endospermo se realiza gracias a la diferencia de densidades. Este equipo es una cámara cilíndrica ancha y relativamente plana gira a velocidad moderada en una montura estacionada. La cámara es generalmente accionada desde el fondo. La alimentación se añade corrientemente por el fondo de la cámara a través de un tubo situado centralmente desde arriba. La cámara contiene cierto número de conos metálicos colocados muy próximos entre sí, que se conocen por discos, que giran con la cámara y están situados uno encima de otro con una separación fija entre ellos. Los discos tienen uno o más agujeros coincidentes que forman canales por donde fluye el producto alimentado. Bajo la acción de la fuerza centrífuga la fase densa se desplaza hacia la pared de la cámara y circula hacia abajo por la parte inferior de los discos, mientras que la fase ligera se desplaza hacia el centro y fluye sobre las caras de los discos. De esta manera los líquidos son separados en capas delgadas y la distancia que cualquier gota de un líquido ha de desplazarse para ser atrapada y extraída en la corriente de salida apropiada es muy pequeña. También se supone que tiene lugar un cizallamiento considerable en la interface líquido-líquido entre las corrientes de líquido en contracorriente que puede facilitar la ruptura de cierta clase de emulsiones y mejorar la separación. Los líquidos separados se extraen por medio de un sistema de vertedero y aquí también se pueden utilizar discos de gravedad diferentes en la salida de la fase densa para controlar la posición de la zona neutra (Brennan et al., 1998).

Singh et al. (2007) menciona que las fuentes principales del almidón para su uso comercial son semillas o granos de cereales (maíz, trigo, sorgo, arroz), tubérculos (papa, chayote), raíces (tapioca, camote, arracacha, mafafa), algunos tallos (sago) y que las propiedades del almidón varían con respecto a su fuente vegetal. Serna-Saldívar. (2009) especifica que en el aislamiento del almidón es necesario realizarlo mediante la aplicación de un separador centrífugo para eliminar la grasa y las



fracciones de matriz proteica de la lechada previamente obtenida de la molienda de endospermo húmero y pasado el tamiz 100 de la serie USA. La industria cartonera más que la alimentaria es la más exigente y solicita como máximo hasta un 2% de la separación de las proteínas.

### **1.17 Almidones modificados**

Los almidones nativos tienen limitaciones de uso ya que son sensibles al pH, a la temperatura y a los esfuerzos de corte extremos, presentan geles débiles, poca estabilidad durante el trabajo mecánico, susceptibilidad al ataque ácido, baja estabilidad, ya que después de ser cocidos recristalizan o retrogradan rápidamente, son poco solubles. En consecuencia de que los almidones nativos no resultan apropiados para desempeñar una función en particular en los alimentos, es por esta razón que se desea modificarlos por diversos tratamientos produciendo una alteración en una o más de las propiedades físicas, químicas o estructurales del almidón, debido a la incorporación de un componente ajeno a su estructura o a su degradación controlada y así poder desarrollar un nuevo grupo de derivados que posean propiedades idóneas para que sean capaces de cumplir propósitos específicos y lograr diversificar aún más su uso y desarrollo de propiedades funcionales en los alimentos (Rivas et al., 2008; Barrios et al., 2009). La modificación del almidón se realiza mediante métodos químicos, físicos y/o enzimáticos (Fleche, 1985). La modificación es entonces el resultado de un tratamiento aplicado para cambiar una o más de sus propiedades físicas o químicas del almidón aislado. Con este proceso se pretende modificar propiedades de pasta, poder de hinchamiento, solubilidad, absorción de agua, formación de gel en el almidón; para diversas aplicaciones en la industria.

### **1.18 Modificación física**

La pre-gelatinización Se considera una modificación física y a cualquier tratamiento térmico efectuado al almidón nativo. La molienda provoca roce y con esto se promueven modificaciones físicas, así los gránulos de almidón “dañados” son fácilmente dispersos en agua fría. Sin embargo, en la práctica comercial, el almidón “pregelatinizado” es obtenido por la simultánea gelatinización y secado de la

dispersión de almidón acuoso. Este almidón modificado físicamente da geles instantáneamente en la adición de agua fría. También se pueden realizar tratamientos térmicos al almidón con temperaturas mayores a la de gelatinización con insuficiencia de agua para causar la gelatinización. Después del sobrecalentamiento el almidón realza su perfil de viscosidad aparente (Tester y Karkalas, 2004).

### **1.19 Modificación química**

La modificación química del almidón es el método más común y el más antiguo en los Estados Unidos de Norteamérica, la cual se lleva a cabo por el tratamiento del almidón nativo con pequeñas cantidades de reactivos químicos. La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo del polímero de almidón. Reacciones vía éter, formación de ésteres, oxidación y la hidrólisis de los grupos hidroxilos, son algunas modificaciones químicas aplicables al almidón (Whistler et al., 1984). Las modificaciones químicas son usadas para intensificar características deseables del almidón e involucra primariamente las reacciones asociadas con los grupos hidroxilo del polímero del almidón. Este tipo de modificación generalmente se realiza en un medio acuoso. Una suspensión de almidón (usualmente de un 30-40% de sólidos) es tratada con un reactivo químico bajo condiciones apropiadas de agitación, temperatura y pH. Cuando la reacción se completa, el almidón se neutraliza para proceder a la purificación del almidón modificado a través de lavados subsecuentes con agua y finalmente se somete a secado para obtener un almidón deshidratado. Wurzburg, (1989), Light. (1990) determinaron que en esta clasificación de modificaciones químicas del almidón en general se dividen en derivación (entrecruzamiento, estabilización y la adición de grupos funcionales) y conversión (hidrólisis, oxidación, dextrinización).

## **2. Capitulo II Metodología experimental (Técnicas para separar e identificar)**

**Problema:** Separación mecánica del almidón de amaranto y su caracterización fisicoquímica.

**Objetivo general:** Aislamiento de almidón de amaranto nativo (*Amaranthus hypochondriacus*) mediante la separación mecánica por centrifugación para su caracterización fisicoquímica.

### **2.1 Objetivos particulares:**

- I. Aislamiento del almidón de amaranto nativo, mediante una centrifuga de discos a diferentes condiciones de proceso para obtener el mayor rendimiento y la mejor eficiencia de separación.
- II. Caracterización química del almidón nativo, mediante las técnicas de la AOAC humedad, grasa proteínas, y la composición mineral para establecer que el almidón presente contenidos menores del 2 % para grasa y proteínas y para obtener el contenido de los analitos de calcio, fósforo, magnesio, potasio.
- III. Determinar el pico máximo del perfil viscoamilografico, la microestructura y el intervalo de gelatinización del almidón, mediante pruebas en un reómetro con celda de almidón, un espectrofotómetro de difracción de rayos X y un calorímetro diferencial de barrido para correlacionar el patrón de difracción de rayos X con el fenómeno de gelatinización del almidón.

### **2.2 Desarrollo Experimental**

Los procedimientos experimentales se resumen en el cuadro metodológico que se muestra en la Figura 9 el cual contiene el problema, objetivos, variables, actividades preliminares, actividades por objetivo, condiciones de trabajo y las técnicas que se utilizaron para la evaluación de las muestras. El cuadro proyecta el trabajo conjunto que se realizó experimentalmente en este proyecto.

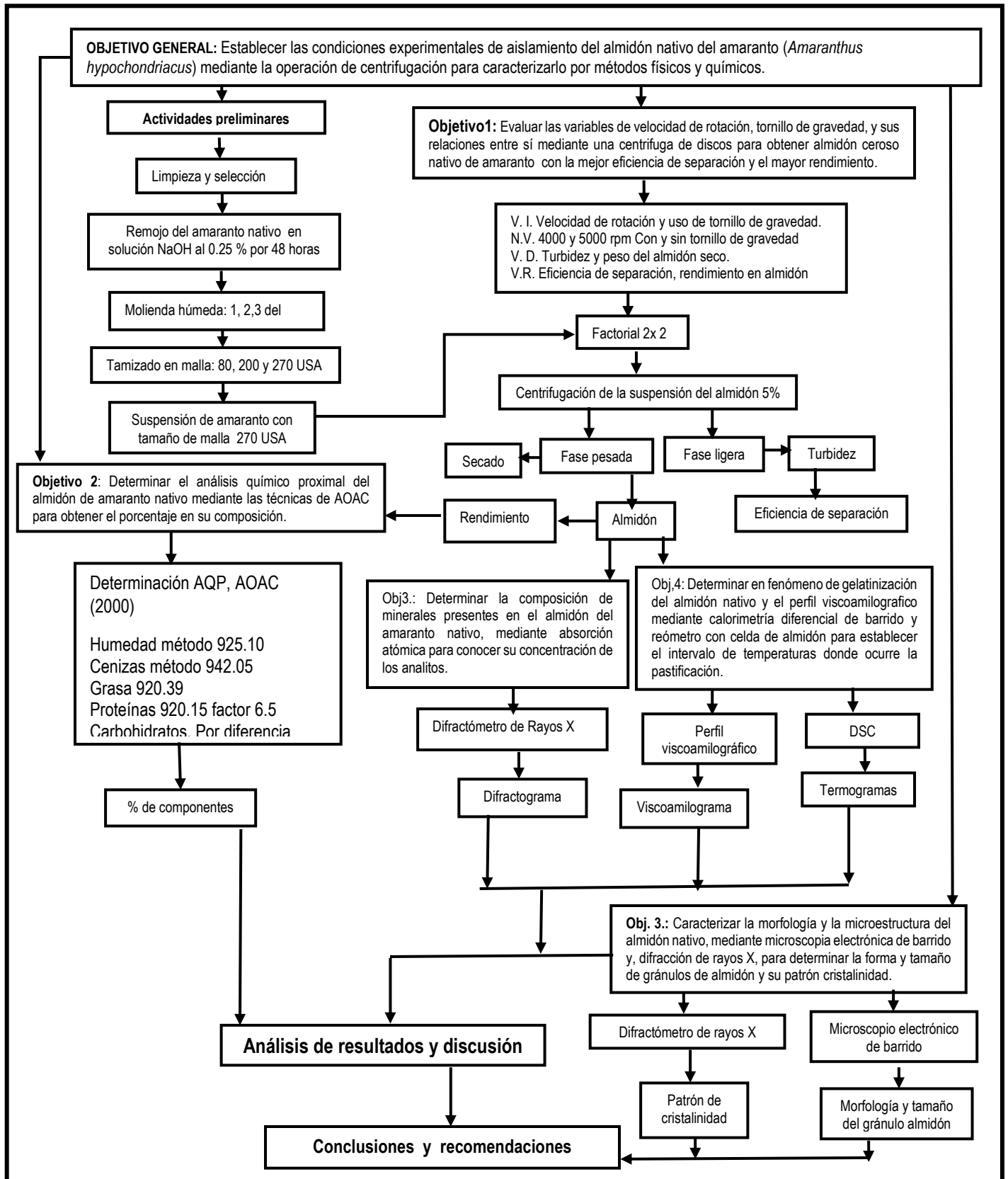


Figura 9 Cuadro metodológico del desarrollo experimental

## 2.3 Actividades experimentales

### 2.3.1 Materia prima y su acondicionamiento

La materia prima que se utilizó fue amaranto nativo (*Amaranthus hypochondriacus*) Los granos de amaranto fueron adquiridos en Santa Fe: Caxa Amaranto” que está ubicada en Fábrica de Armas # 8, Col. Lomas del Chamizal. Cp.05129, con la página web [caxaamaranto.com.mx](http://caxaamaranto.com.mx) y correo electrónico [info@caxaamaranto.com.mx](mailto:info@caxaamaranto.com.mx) . En la Figura 10 se muestran los granos de amaranto nativo.



**Figura 10 Granos de Amaranto Nativo**

Se revisó la calidad de los granos de amaranto nativos de acuerdo con su apariencia, es decir, que no estuvieran dañados, ni rotos, los granos con alteraciones fueron eliminados manualmente, ya que estos podrían afectar las unidades experimentales, además fueron eliminados aquellos granos que no tuvieran el color café claro, con tendencia a amarillos.

### 2.3.2 Diagrama de bloques del proceso de separación de almidón de amaranto.

El diagrama de separación del almidón de amaranto nativo se muestra en la Figura 11. Se siguieron todos los procedimientos mostrados.

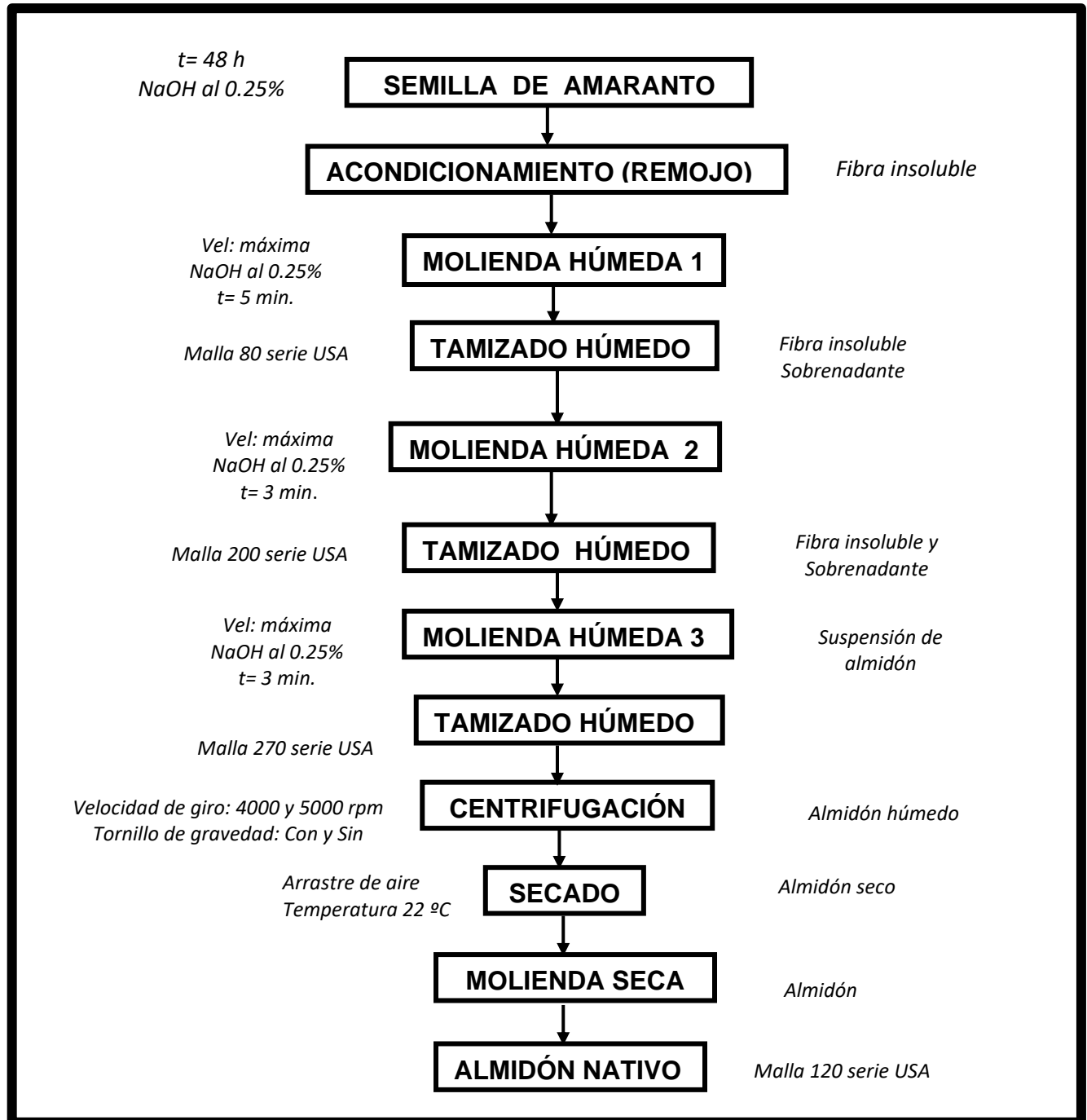


Figura 11 Diagrama de bloques de separación de almidón de amaranto nativo.

Se preparó una solución de 20 litros al 0.25 % de NaOH con agua destilada a temperatura ambiente como muestra la Figura 12 y posteriormente se agregó 1 kg de amaranto nativo el cual se mezcló por 15 minutos en un mezclador de propela marina a 400 rpm. Posteriormente, se preparó otro contenedor con el mismo procedimiento. con un homogeneizador marca IKA-WERKE modelo EUROSTAR BSC.S1



**Figura 12 Solución de NaOH con amaranto nativo**

Las soluciones se almacenan en refrigeración por 48 horas a 5 °C para hidratar, remover toda la Fibra y eliminarla. En la Figura 13 se muestra el procedimiento de molienda y tamizado en húmedo.



**Figura 13 Molienda húmeda y tamizado del amaranto húmedo, a) molienda, b) colado, c) tamizado.**

El amaranto remojado, se trituro con su solución de NaOH 0.25 % en un molino Osterizer, 267 D-2362 (Figura 13a), posteriormente se pasó en un colador para eliminar la fibra (Figura 13b), lo que paso fue nuevamente molido y se hizo pasar a través de los tamices 80 USA. Después, se volvió a moler, se pasó por 200 USA, finalmente se molió y paso por tamiz 270 USA de acuerdo con la Figura 13c.

### 2.3.3 Separación del almidón en una centrifuga de discos (Objetivo 1)

Una vez armada la centrifuga se siguió el manual de operación para el arranque y puesta en marcha. La suspensión obtenida de los diferentes tamizados fue mezclada por 10 min con una propela marina a una velocidad de 800 rpm con un homogeneizador marca IKA-WERKE modelo EUROSTAR BSC.S1. Posteriormente, Se ensambló la centrífuga según la Figura 14a. Los discos se acomodaron del 1-77 discos de menor a mayor, poner y quitar los tornillos (de acuerdo con la corrida), se llenó el tanque de alimentación (Figura 14b). Fue separado el almidón en una centrifuga de discos marca Didacta Italia, Modelo TAG 1/d (Figura 14c) utilizando diferentes condiciones de proceso. Las condiciones experimentales en que se llevó a cabo la operación fueron con o sin tornillo, 4000 y 5000 rpm, se tomó muestra de la suspensión original y fase ligera para hacerle pruebas de turbidez

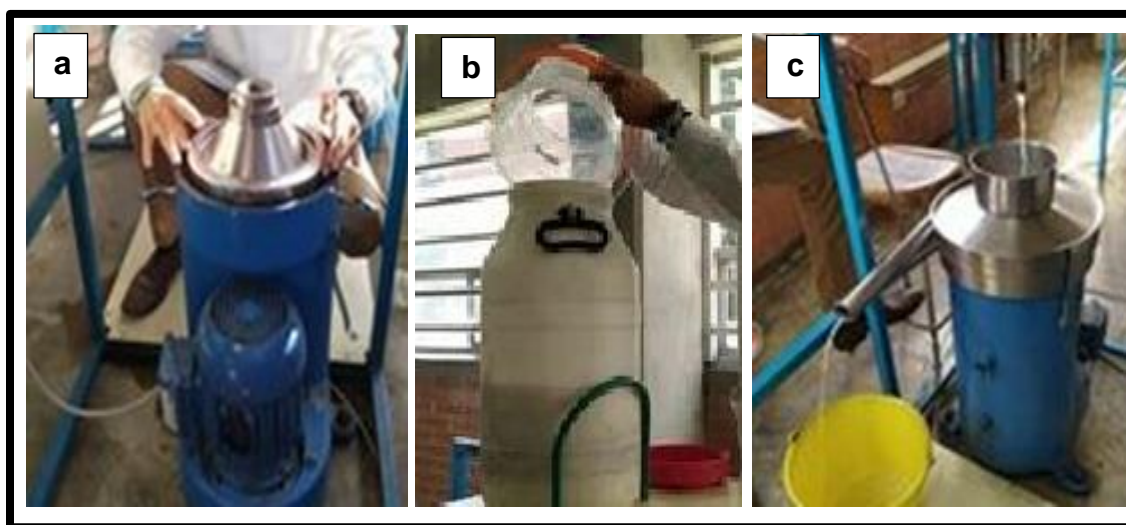


Figura 14 Separación mecánica del almidón de amaranto nativo, a) armado de la centrifuga, b) llenado del tanque, c) separación mecánica del almidón de amaranto.



## 2.4 Eficiencia de separación

La medición de turbidez se obtuvo con el turbidímetro marca Hanna Instruments modelo LP 2000 que se presenta en la Figura 15. El turbidímetro es un instrumento que mide con unidades nefelométricas. La turbidez causada por partículas suspendidas en un líquido, la técnica consiste en hacer pasar un rayo de luz a través de la muestra, en consecuencia, la luz reflejada por las partículas presentes en la muestra se mide en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente. Las lecturas se dan en unidades nefelométrías (NTU). Que se muestra en la Figura 15a, posteriormente fue leída su turbidez (ver Figura 15b).

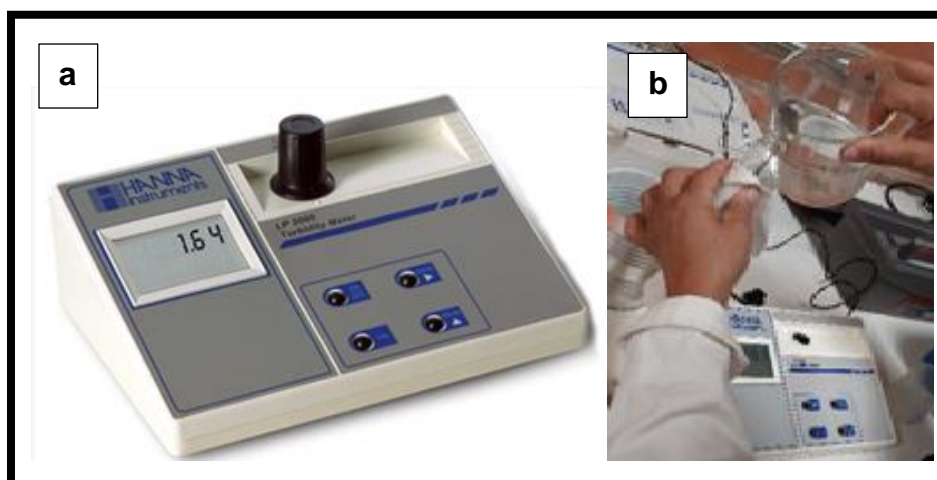


Figura 15 Determinación de la Turbidez, a) turbidímetro Hanna Instruments, modelo LP 2000, b) lecturas de líquido de la fase ligera.

10 mL de muestra de la suspensión original y las muestras de cada corrida experimental fueron obtenidos de la fase ligera del equipo, luego se midieron los NTU en el turbidímetro y se determinó la eficiencia de separación con los valores tomados de turbidez, utilizándola ecuación 1.

$$\text{Eficiencia de separación} = \left( \frac{T_s - T_{fl}}{T_{fl}} \right) * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$T_s$ = Turbidez de la suspensión original  
(ntu).

$T_{fl}$ = Turbidez de la fracción ligera (ntu)

## 2.5 Rendimiento

El rendimiento se obtiene con la cantidad de gramos de amaranto nativo utilizado y tratado y con los gramos de almidón obtenido de la centrifuga, como muestra la Figura 16 a y b. Fue recolectado de todos los discos, y tazón de la centrifuga como muestra la Figura 16c. Posteriormente, ese almidón se secó por arrastre de aire de acuerdo con la Figura 16d, ya que ambas muestras se consideran en base seca. El rendimiento se calculó con la ecuación 2.

$$\text{Rendimiento} = \frac{P_{aa}}{P_{sa}} * 100$$

Ec... (2)

Donde:

*Paa*: Peso del almidón de amaranto (g)

*Psa*: Peso de la semilla de amaranto (g).



Figura 16 Separación mecánica de almidón de amaranto, a) recolección de almidón del tazón, b) recuperación de los discos, c) eliminación de agua por arrastre de aire, d) almidón seco.

## 2.6 Análisis estadístico.

De acuerdo con la revisión bibliográfica y experimentos anteriores se determinó que los factores que influyen en la centrifugación son la velocidad de alimentación, la velocidad de giro y el uso del tornillo de gravedad. La centrifuga de discos permite su variación y produce efectos en el producto, en consecuencia, se refleja en la determinación de la eficiencia de separación y el rendimiento, así como en las propiedades del almidón nativo.

En la tabla 5 se muestran las variables independientes y los niveles de variación elegidos para las corridas experimentales.

**Tabla 5 Variables independientes**

<b>Variable independiente</b>	<b>Niveles de variación</b>
Velocidad de rotación	4000 y 5000 rpm
Uso de tornillo de gravedad	Con y sin tornillo

En la variación de la velocidad de alimentación se mantuvo constante 200 mL/min y la velocidad de rotación se establecieron valores cercanos debido a que los valores de extracción del almidón de maíz se realizan a bajas velocidades de rotación a, los niveles propuestos facilitan su control y el material puede fluir hacia la centrifuga, mientras que la opción de utilizar el tornillo de gravedad causa el efecto de regular la salida de la fase ligera y alargar los tiempos de residencia.

Con ello, se llevó a cabo un diseño de experimentos factorial con dos factores y dos niveles de variación ( $2^2$ ), su aplicación permitió medir cómo influyen a las variables en el rendimiento y la eficiencia de separación, incluso, descubrir cómo interaccionan entre ellos. La variación de estas variables en dos niveles resultó el diseño de 4 tratamientos con tres repeticiones, el cual presentó a las variables en la tabla 5. Estas condiciones fueron utilizadas para la centrifugación de la lechada de manera independiente, en todas las corridas para obtener las unidades experimentales.

Los resultados obtenidos fueron analizados empleando el Software Minitab 16, para las variables de respuesta, rendimiento y eficiencia de separación. Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95% ( $\alpha=0.05$ ). Todos los tratamientos se realizaron por triplicado.

### **2.7 Análisis químico proximal del almidón nativo (Objetivo 2).**

Se determinó el análisis químico proximal del almidón amaranto nativo (objetivo 2) mediante las técnicas de AOAC (2000) para obtener el porcentaje en su composición. Para la humedad se utilizó el método 925.10, las cenizas 942.05, lípidos 920.39 y proteínas 920.15 utilizando el factor de cálculo 6.5. y carbohidratos por diferencia de densidades.

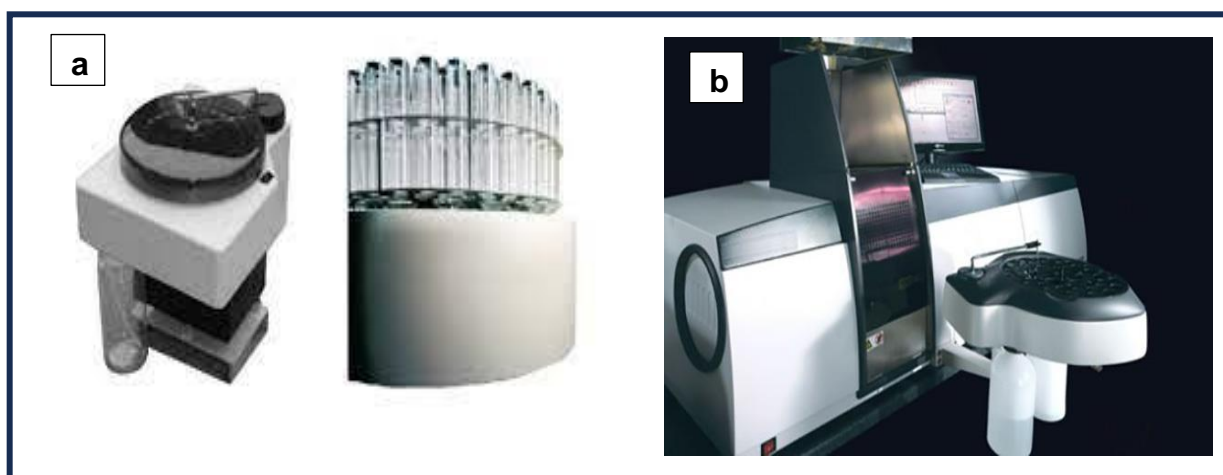
### **2.8 Determinación de minerales del almidón nativo.**

La determinación de los minerales es importante para conocer su concentración en el almidón, ya que este le da características especiales, como su temperatura de gelatinización. Esta actividad se realizó por espectrofotometría de absorción atómica para muestras de almidón nativo de amaranto.

Para determinar el analito en la muestra fue necesario proporcionarles energía a los átomos y subir el nivel a los electrones, lo que se llevó a cabo en el equipo, utilizando una lámpara de cátodo hueco para cada mineral utilizado Ca, P, Mg, S, Na, K, Al, Fe, Zn, Cu.

En este nivel, los electrones están en un estado excitado con muy poca estabilidad tratando de regresar a su nivel original. Los electrones en un átomo en estado basal absorben un quantum, de energía, es decir tienen una transición de un nivel de baja energía, a uno de alta energía. Cuando el electrón regresa al estado base hay emisión de luz. Se genera una serie de líneas a longitudes de onda bien determinadas a la cual se le conoce como espectro, que es detectado por un espectrofotómetro y que es específica para cada uno de los elementos. La absorción de energía y la concentración del analito están cuantitativamente relacionadas con la ley de Lambert-Beer (Amezquita, 2003).

Se tomaron 50 gramos de almidón nativo, se molieron en un molino de cuchillas (Braun modelo KSM2, se hicieron pasar por un tamiz malla 60 USA y se recolectó. 0.25 g de muestra se colocaron en los vasos del digestor. Se le agregaron a cada vaso 10 mL de ácido nítrico, se taparon y se sellaron herméticamente (ver Figura 17a). Se colocaron los vasos en el carrusel y se introdujeron al horno de microondas (ver Figura 17b), el cual se programó a tres rampas de calentamiento: La primera a temperatura ambiente hasta 130 °C en 4.30 min. La segunda de 130° hasta 150 °C en 4,0 min y la última de 150 a 175 °C en 4.0 minutos, manteniendo la temperatura constante durante 15 minutos. Posteriormente las muestras se dejaron enfriar.



**Figura 17 Determinación de minerales, a) Carrusel con vasos, b) digestor en microondas.**

Después de digerir la muestra se filtró con papel No. 42, se le adicionó 1 mL de óxido lantano y se aforó con 10 0mL con agua tridestilada (previamente preparados los estándares de los diferentes materiales para hacer su curva y calibrar el equipo. Para leer cada uno de los elementos se colocó en el espectro la lámpara correspondiente. Por ejemplo, para calcio, Se colocó la lámpara de cátodo hueco de Ca en el espectro, mientras la muestra se colocó en el vaso de precipitado para introducir el nebulizador para los otros minerales fósforo, magnesio, azufre, Sodio, potasio, aluminio, fierro. Finalmente, las muestras se leyeron en un espectro de absorción atómica de flama utilizado como gases de aire acetileno para producir flama. Se eligió una longitud de onda correspondiente a cada mineral en nm para poder leer. El porcentaje de absorción registrado por el detector es una medida de

la concentración del elemento de la muestra. Las condiciones en las que se operó el equipo fueron: Aire 12 psi, flama 422,7 nm, lámpara de uso de 10 mA y corte de ancho 0.7 nm. Los valores de la concentración de calcio y de los demás elementos serán graficados.

## **2.9 Determinar la gelatinización del almidón nativo**

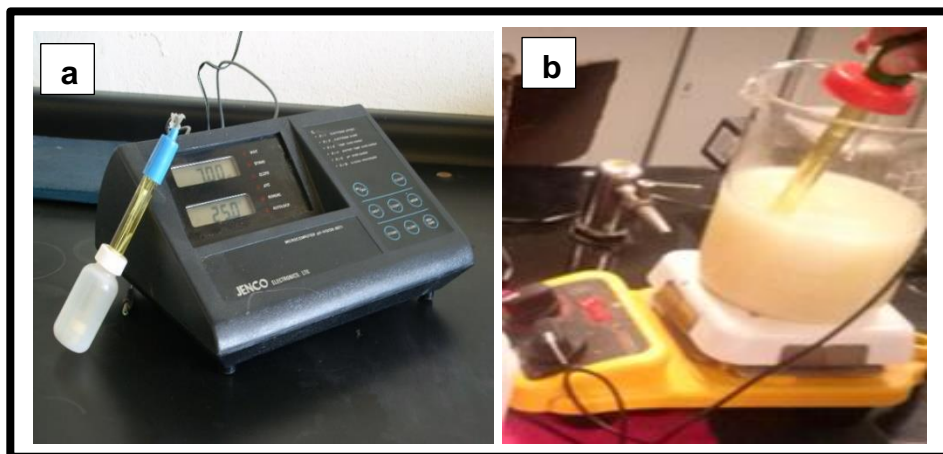
### **2.9.1 Neutralización de la suspensión**

La suspensión se vertió a un recipiente de mayor volumen y se mantuvo en agitación constante con un agitador magnético Cimarec marca Thermo Scientific, además, se incorporó una bureta como se aprecia en la Figura 18, se agregó a la bureta NaOH a la misma molaridad del HCL agregado a la suspensión para neutralizar.



**Figura 18 Suspensión en agitación y con bureta incorporada**

Por consiguiente, se determinó el pH de la suspensión con un potenciómetro Marca HANNA Instruments calibrado previamente y se neutralizó agregando cuidadosa y gradualmente la solución de NaOH a la misma molaridad. Mientras la suspensión permanecía en agitación por 60 minutos se midió en el potenciómetro Figura 19 como guía para agregar NaOH y alcanzar un pH neutro.



**Figura 19 Medición de pH a) Potenciómetro Jenco Electronics, LTD, Mod. 6071, b) medición del pH de la suspensión.**

La Figura 19 se observa la medición para la neutralización Figura a, b la suspensión se procedió hacer la separación centrifuga del almidón.

### **2.9.2 Centrifugación de la suspensión neutralizada**

El almidón de la suspensión neutralizada se separó en una centrifuga de discos Didacta Italia, Modelo TAG 1/d operando a las condiciones de separación centrifugación del almidón nativo. Se realizó el mismo procedimiento alimento y se agregó la suspensión directamente en la entrada de alimentación, En la Figura 20 se muestra la centrifugación de almidón neutralizado.



**Figura 20 Centrifugación del almidón modificado.**

Como se describió anteriormente, la fase pesada se recolectó a su salida para obtener el almidón y, por el contrario, la fase ligera se desechó. El líquido recolectado se vertió en un recipiente y se puso en reposo por dos horas para

eliminar el líquido sobrenadante y recuperar los sólidos depositados en el fondo del recipiente. Los sólidos recuperados se presentan en una masa semi húmeda. En la Figura 21.



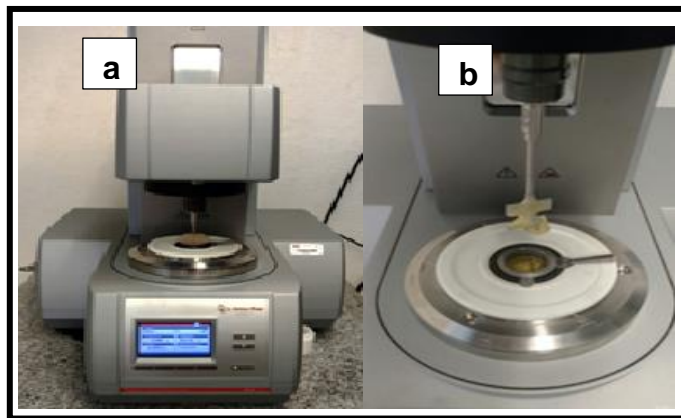
**Figura 21 Almidón con tratamiento ácido de amaranto.**

La masa semihúmeda se sometió a secado por arrastre de aire. El almidón modificado de amaranto se pesó, se almacenó en una bolsa de sellado hermético.

## **2.10 Caracterización fisicoquímica de almidón**

### **2.10.1 Determinación del perfil viscoamilográfico**

Es necesario conocer el desarrollo de la formación del gel en las diferentes muestras de almidón, ya que se requiere conocer el perfil viscoamilográfico. El comportamiento del fenómeno de gelatinización y los perfiles de viscosidad del almidón, se determinó en un reómetro Figura 22 equipado con una celda de almidones, que consiste en un calentamiento, una isoterma y el enfriamiento de la muestra en el equipo (Rincón-Londoño *et al.*, 2016).



**Figura 22 Prueba de viscosidad en celda de almidón a) Reómetro Anton Paar MCR 102, b) impulsor del reómetro**



Las muestras fueron ajustadas a 12 % de humedad, el perfil de viscosidad fue llevado a las inicialmente a la temperatura del sistema de 50 °C y permaneció constante por un minuto. La muestra fue calentada por 5.3 minutos desde 50 hasta 90 °C. Después, se mantuvo constante la temperatura a 90 °C durante 5.3 minutos, en seguida las muestras fueron enfriadas hasta 50 °C en un tiempo de 5.3 minutos en esta temperatura se mantuvo constante por 1 minuto en el Reómetro Anton Paar (St. Albans, United Kingdom, Modelo MCR 102). Todas las pruebas fueron realizadas a una frecuencia cte. de 193 rpm Figura 21 a, b, que muestran las partes del equipo. Esta metodología fue establecida por Rincón-Londoño *et al.* (2016).

### 2.10.2 Difracción de Rayos X

Las muestras experimentales se colocaron en la porta muestra del difractómetro de Rayos X (Bruker D5005, Inglaterra) de ángulo ancho, equipado con una fuente de cobre operado a 40 KV y 30 mA, produciendo una radiación de  $\text{CuK}\alpha$  con una longitud de onda de 1.54 Å

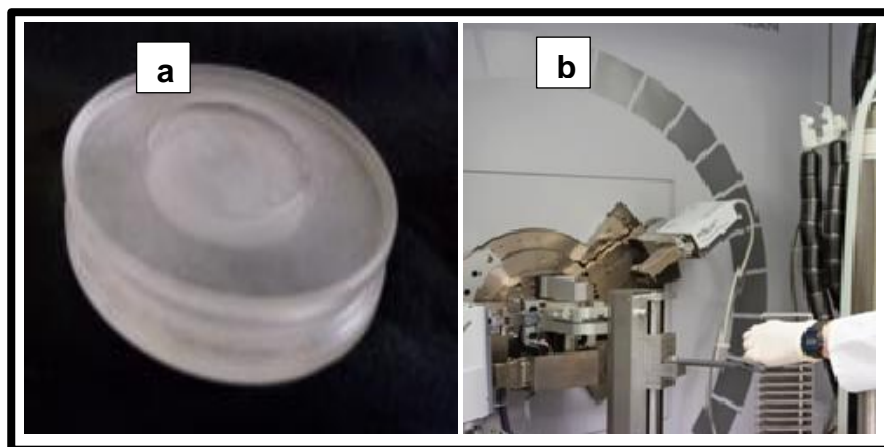


Figura 23 Determinación de Rayos X a) Porta muestra para Rayos X. b) Difractómetro de Rayos X

(Bruker D5005, Inglaterra).

Los datos se recolectaron en un rango de 4-38° a intervalos de 0.1° con una velocidad de barrido de 60s/°. La línea base del difractogramas se corrigió en el intervalo de barrido y el vector se normalizó utilizando el software OPUS 3.0 (Bruker, UK). Y luego se compararon los picos.

El difractómetro utiliza rayos x que son ondas electromagnéticas de longitudes de onda muy pequeñas entre el orden de  $10^{-9}$  y  $10^{-5}$ , invisibles al ojo humano. Al hacer llegar rayos X a la muestra, dependiendo de su transparencia, pueden cruzar la sustancia o puede suceder el fenómeno de difracción de rayos X, que consiste en que la luz se dobla al pasar por el extremo de una superficie y no sigue la propagación de la línea recta.

Para esto, las muestras de almidón nativo y modificado se pesaron y se recolectó un gramo como muestra, la cual se colocó en el porta muestras del equipo (pm), la muestra se comprimió para llenar los espacios vacíos después fue introducida a la cámara del difractómetro de rayos X.

Las condiciones de operación para la muestra de almidón fueron: a 35 kv y 15 mA, con una radiación de  $\text{CuK}\alpha$ , con longitud de onda  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ . Estos datos fueron recolectados de  $4$  a  $30^\circ$  En escala  $2\Phi$ , con pasos de  $0.05^\circ$  a una velocidad de  $0.1^\circ \text{ seg}^{-1}$  y un tiempo de conteo por punto de 5 segundos.

Se utilizó el mismo procedimiento para todas las muestras. La gráfica obtenida del material se le conoce como Difractograma de rayos X el cual se analizó utilizando el método de Rodríguez et al. (1996). El software empleado para el espectro fue (Difracción/AT, SOCAVIN VI.2).

### 3. Capítulo III Resultados y análisis

#### Actividades experimentales

##### 3.1 Materia prima y su acondicionamiento.

5 kilos de semilla de amaranto se utilizaron para hacer la suspensión y separación del almidón nativo,

##### 3.2 Diagrama de bloques del proceso de extracción de almidón nativo de amaranto.

Se dio seguimiento al diagrama de bloques para hacer la separación mecánica del almidón de amaranto nativo. Este diagrama fue el que mostró las condiciones experimentales en la separación del almidón.

##### 3.3 Separación del almidón en una centrifuga de discos (Objetivo 1).

###### 3.3.1 Resultados de eficiencia de separación.

En la Tabla 6 se observa el promedio, desviación estándar y porcentaje del coeficiente de variación de la turbidez de la fase ligera del amaranto nativo.

**Tabla 6 Resultados de la turbidez de la fase pesada de la separación mecánica por centrifugación.**

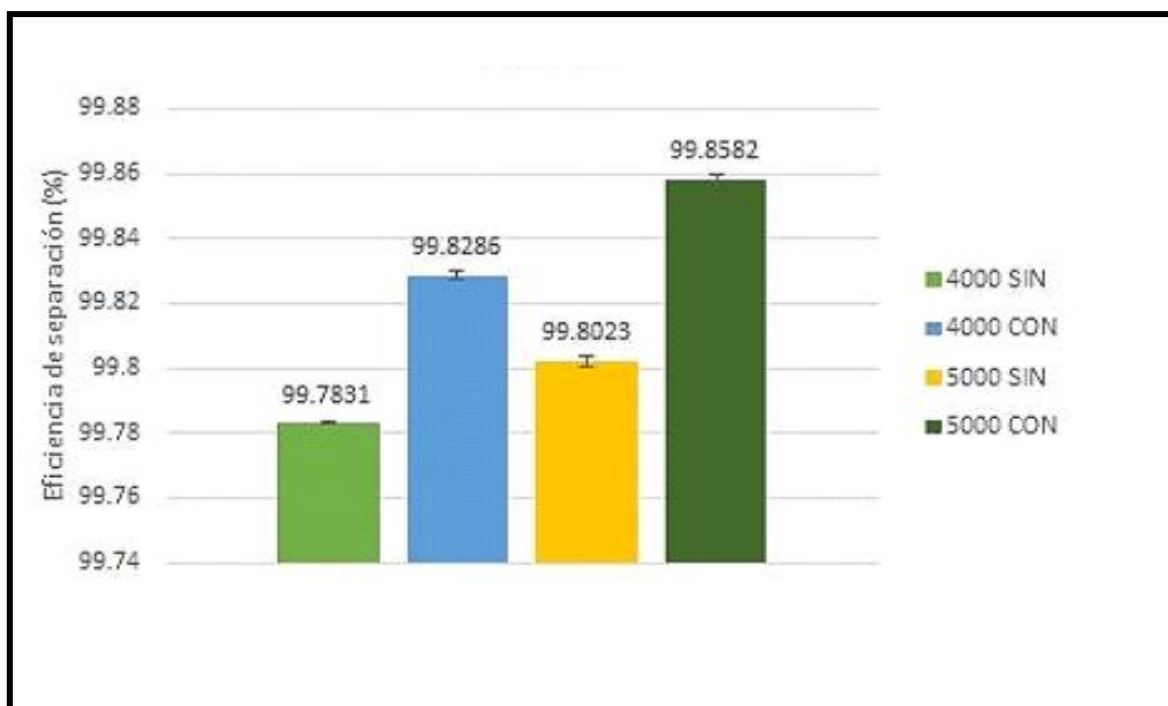
<b>Tornillo</b>	<b>rpm</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación S.</b>	<b>% CV</b>
<b>sin</b>	4000	73.0400	0.1744	0.2388
<b>con</b>	4000	57.7130	0.4419	0.7657
<b>sin</b>	5000	66.5930	0.6080	0.9130
<b>con</b>	5000	47.7730	0.4834	1.0119

En la Tabla 6 se presenta que la solución que tuvo mayor turbidez es a 4000 rpm sin tornillo de gravedad, seguida por la solución de 5000 rpm sin tornillo, por lo que una centrifugación sin tornillo presenta una menor separación de almidón y como consecuencia la turbidez es más alta porque hay muchos sólidos en la fase ligera. A mayor velocidad de giro siempre es menor la

turbidez debido a los sólidos presentes que no alcanzaron a separarse.

Se puede observar que no hay una diferencia significativa, ya que todas las corridas presentaron una eficiencia mayor a 99 %, esto se debe a que se separó una cantidad mínima de los sólidos totales porque ya se había separado durante los tamizados efectuados y que la centrifuga de discos separa en otra fase la grasa y los componentes proteicos. La eficiencia de separación se obtuvo con la ecuación del capítulo 2 de esta tesis.

En la Figura 24 se muestra su gráfica comparativa de la eficiencia de separación en (%), para todas las condiciones experimentales trabajadas de 4000 rpm con y sin tornillo y de 5000 rpm con y sin tornillo, en colores se identifica el promedio de cada eficiencia obtenida para cada unidad experimental.



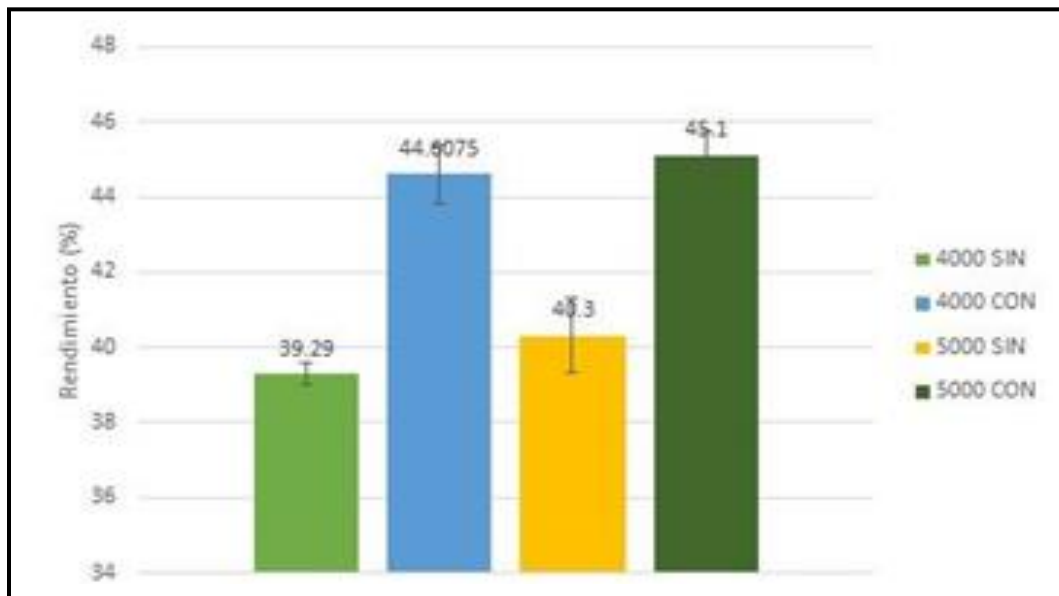
**Figura 24 Eficiencia de separación para cada corrida experimental del almidón**

La eficiencia de separación, obtenida se evidencia que realmente a 4000 y a 5000 rpm en la centrifuga casi tiene el mismo efecto en la separación, debido a que se seleccionó el intervalo de extracción de acuerdo con lo reportado por Copeland *et al*, (2009) y en cualquiera de esas condiciones es arriba del 99

%, las corridas experimentales para separar a los almidones utilizando la variable con tornillo de gravedad. Palma-Rodríguez *et al.* (2012) explican que la eficiencia de separación representa a la pureza en que se obtiene el almidón, sin fibra insoluble, sin grasas, se permite hasta un 2 % de proteínas. De manera que en estas muestras de amaranto se obtuvo una excelente eficiencia de separación con tornillo de gravedad, la salida de la fase ligera es más lenta de manera que el tiempo de residencia en el equipo es mayor, lo que permite mejor separación.

### 3.3.2 Rendimiento en almidón.

El rendimiento en almidón es la cantidad de gramos obtenido por 100g de semilla de amaranto utilizada en base seca y se obtuvo con la ecuación del capítulo 2 de esta tesis y se presenta la gráfica en la Figura 25.



**Figura 25 Rendimiento para cada corrida experimental del almidón**

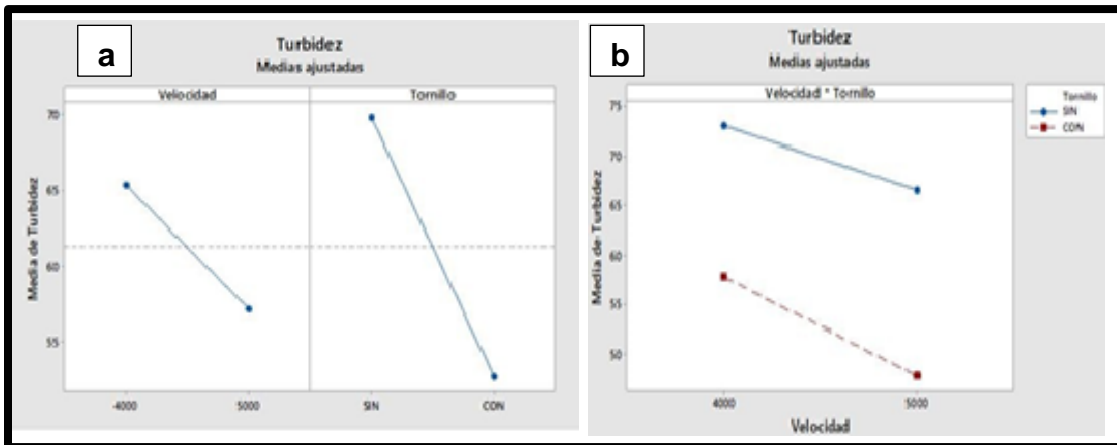
La Figura 25 presenta los valores de rendimiento de todas las corridas experimentales. Muestra que los experimentos realizados con tornillo de gravedad obtuvieron un 5 % más de rendimiento a las mismas velocidades, es decir, la mayor fue a 5000 rpm con tornillo de gravedad con un rendimiento de 45.1 %, mientras que la de menor rendimiento fue de 39.29 %. De acuerdo

con Shing *et al*, 2003, el reporta que por lo menos hay un 50 % de amaranto en el almidón. Por lo que los resultados obtenidos fueron muy cercanos a los reportados por ellos.

### 3.4 Análisis estadístico.

#### 3.4.1 Turbidez de la fase pesada.

La Figura 26 presenta el análisis estadístico de la turbidez, la Figura a) presenta la gráfica de efectos principales de turbidez en la fase pesada a 4000 y 5000 rpm influencia de la velocidad y el tornillo de gravedad y en la b) la gráfica de interacciones.



**Figura 26 Gráficas del estadístico de turbidez, a) gráfica de efectos principales de Turbidez en la fase pesada, b) de interacciones entre la velocidad de giro y el tornillo de gravedad.**

La turbidez depende de la velocidad de giro al momento de llevar a cabo la operación unitaria de centrifugación a una velocidad de giro de 5000 rpm la turbidez es menor, Así mismo con tornillo de gravedad, fue menor. Mientras que a velocidades de 4000 rpm tienen mayor turbidez, al igual que sin tornillo de gravedad. Sin embargo, tiene mayor influencia el uso o des uso del tornillo (Figura a). Cuando se usan los tornillos de separación y cambia la velocidad de giro se presentan dos líneas paralelas levemente inclinadas (Figura b), lo que indica que no hay interacción entre las variables de proceso. Por lo que la

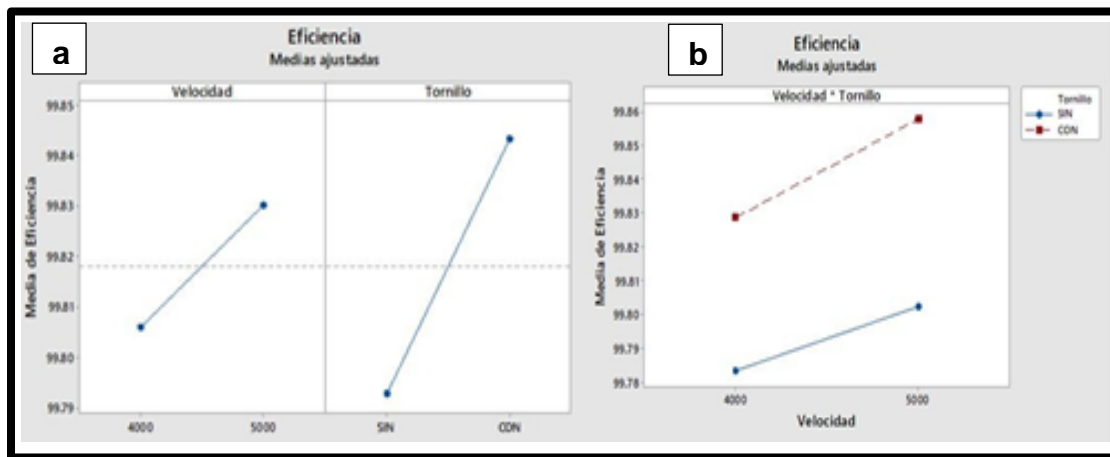
turbidez de la fase pesada sólo depende de una de las variables con las que se trabajan.

Con estos datos se utilizaron las ecuaciones para el cálculo de la eficiencia de separación. También se incluyó la turbidez inicial de la suspensión para poder calcular con la ecuación la eficiencia.

Hay que puntualizar que la turbidez es un parámetro importante debido a que de manera indirecta mide la cantidad de sólidos presentes en la suspensión. Por esa razón a menor turbidez, menor contaminación en la fase pesada, es decir tiene mayor pureza de acuerdo con lo reportado por Palma-Rodríguez. (2012), en sus separaciones mecánicas de almidón.

### 3.4.2 Eficiencia de separación

La eficiencia de separación presentada en las corridas experimentales. En la Figura 27 se presenta el análisis estadístico con dos gráficas, La Figura **a** presenta el análisis estadístico de la eficiencia, y la **b** presenta la gráfica de efectos principales de velocidad a 4000 y 5000 rpm en la fase pesada y de interacciones.



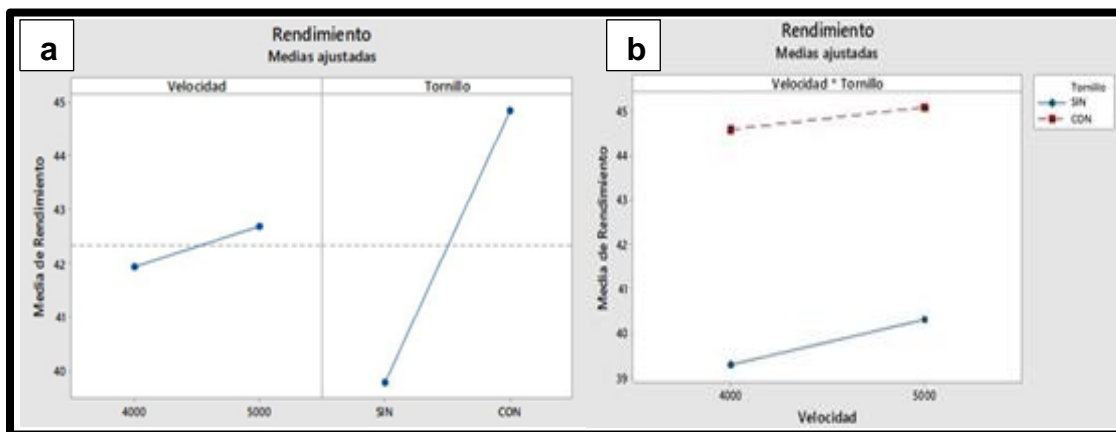
**Figura 27 Gráficas del estadístico de eficiencia, a) gráfica de efectos principales de eficiencia en la fase pesada, b) de interacciones de la velocidad de giro y el tornillo de gravedad**

En la Figura 27 observamos que no hay una diferencia significativa, ya que todas las corridas presentaron una eficiencia mayor a 99 %, esto se debe a que se separó una cantidad mínima de los sólidos totales por centrifugación, estos se habían retirado por tamizado por ello nos da una eficiencia muy alta. Aun así, la corrida que presenta una mayor eficiencia de separación es a 5000 rpm con tornillo de gravedad tiene el mayor % de eficiencia de separación, debido a que el uso del tornillo se relaciona con el tiempo de residencia es decir a mayor abertura de tornillo, el tiempo de residencia se disminuye y la turbidez de la fase ligera es mayor.

En cuanto a la interacción de las variables velocidad y tornillo de gravedad no presentaron ninguna, pero si a mayor velocidad mayor eficiencia, de igual manera con un tornillo de gravedad cerrado mayor eficiencia de separación.

### 3.4.3 Estadístico del rendimiento

El rendimiento es el almidón que se obtiene en 100 g de material utilizado. En la Figura 28 se presenta el análisis estadístico. La Figura **a** presenta el análisis estadístico del rendimiento, y la **b** presenta la gráfica de efectos principales de velocidad a 4000 y 5000 rpm en la fase pesada y de interacciones entre la velocidad de rotación de la centrifuga y de con o sin tornillo de gravedad.



**Figura 28 Gráficas del rendimiento, a) gráfica de efectos principales del rendimiento, b) interacciones entre la velocidad de rotación y el tornillo de gravedad.**



El rendimiento del almidón de amaranto depende del uso o no del tornillo de gravedad, debido a que las velocidades no tuvieron influencia muy grande porque fueron realmente el nivel de variación no fue tan alejado, y estas fueron seleccionadas en un intervalo de separación recomendado por Palma-Rodríguez. (2012). Utilizando el tornillo de gravedad, aumenta el rendimiento de almidón de amaranto (Figura a). En la Figura b hay dos líneas paralelas levemente inclinadas por lo que no existe interacción entre los factores o variables ya que estas no se cruzan entre sí. Estas están muy lejos y aunque se cambiaran las condiciones de separación parecen estar lo bastante alejadas para un cruce.

### 3.5 Resultados del análisis químico proximal de la harina de amaranto y del almidón de amaranto nativo mediante las técnicas de AOAC para obtener el porcentaje de su composición.

En la tabla 7 se muestra la composición química de la harina de amaranto.

**Tabla 7 composición química de la harina de amaranto nativo**

<b>Componente</b>	<b>Componente Harina (%)</b>	<b>Componente Almidón (%)</b>
<b>Humedad</b>	9.22 ± 0.06	6.34% ± 0.04
<b>Proteínas</b>	17.3 ± 0.27	0.12 ± 0.01
<b>Grasa</b>	7.21 ± 0.42	0.18 ± 0.07
<b>Carbohidratos</b>	60.3 ± 1.04	89.38 ± 0.12
<b>Fibra cruda</b>	3.1 ± 0.11	1.46 ± 0.04
<b>Minerales</b>	2.95 ± 0.03	2.53 ± 0.05

La Tabla 7 muestra que el porcentaje de proteínas 17.3 %. Este valor del seudo cereal es mucho mayor que cualquier harina de cereales. Así mismo la grasa 7.21%. Sin embargo, un buen almidón debe tener porcentajes mínimos al 2 % de grasa y proteínas. Lo que muestra que el almidón separado en este trabajo se ha obtenido con una alta eficiencia de separación, ya que los valores son 0.12 y 0.18 para proteínas y grasa respectivamente.

Ya de entrada este almidón tiene características especiales, ya que es un almidón ceroso que tendrá poco desarrollo de viscosidad y bajo en índice glucémico, lo que lo hace un excelente material para el desarrollo de alimentos muy nutritivos o bien para el utilizar este almidón para la elaboración de nanopartículas (Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2021).

En la Tabla 8 se registra el contenido de minerales en el almidón, debido a que es necesario caracterizar un almidón tan importante y tan poco estudiado como es el almidón de amaranto.

**Tabla 8 contenido de minerales del almidón nativo**

<b>Minerales</b>	<b>mg/kg</b>
<b>Calcio (Ca)</b>	867.22± 1.86
<b>Fósforo (P)</b>	493.32± 1.63
<b>Magnesio (mg)</b>	294.16± 0.42
<b>Azufre (S)</b>	282.16± 0.84
<b>Sodio (Na)</b>	177.52± 1.25
<b>Potasio (k)</b>	143.29± 1.21
<b>Aluminio (Al)</b>	88.17± 0.02
<b>Fierro (Fe)</b>	76.48± 0.11
<b>Zinc (Zn)</b>	30.29± 0.07
<b>Cobre (Cu)</b>	0.082± 0.00

El mayor contenido de minerales es de calcio con  $867.22 \pm 1.86$  mg/kg y de fósforo con  $493.32 \pm 1.63$  mg/kg. La relación de estos minerales es excelente ya que para que exista una buena absorción de calcio debe haber una relación Ca: F, en un intervalo 1:1.5 - 1:2. De manera que si encuentra esta relación podrá ser absorbido en el organismo y utilizado para la formación de huesos, dientes y funciones metabólicas en la célula y en el cerebro de acuerdo con lo reportado por Rojas-Molina *et al.* (2009). Esto hace que este tipo de almidones proporcione energía al cuerpo. Pero tratándose del almidón de amaranto es bajo en índice glucémico. También presenta una importante cantidad de magnesio y de potasio y de otros minerales importantes como el Zn. Lo que hace muy importante a este tipo de almidón dadas sus propiedades tan distintas a otros almidones obtenidos de tubérculos y de cereales.

### **3.6 Caracterización fisicoquímica de los almidones nativo**

#### **3.6.1 Resultados del perfil viscoamilográfico (Rehómetro con celda del almidón).**

En la Figura 29 se presenta el perfil viscoamilografico del almidón nativo de amaranto con todas sus etapas.

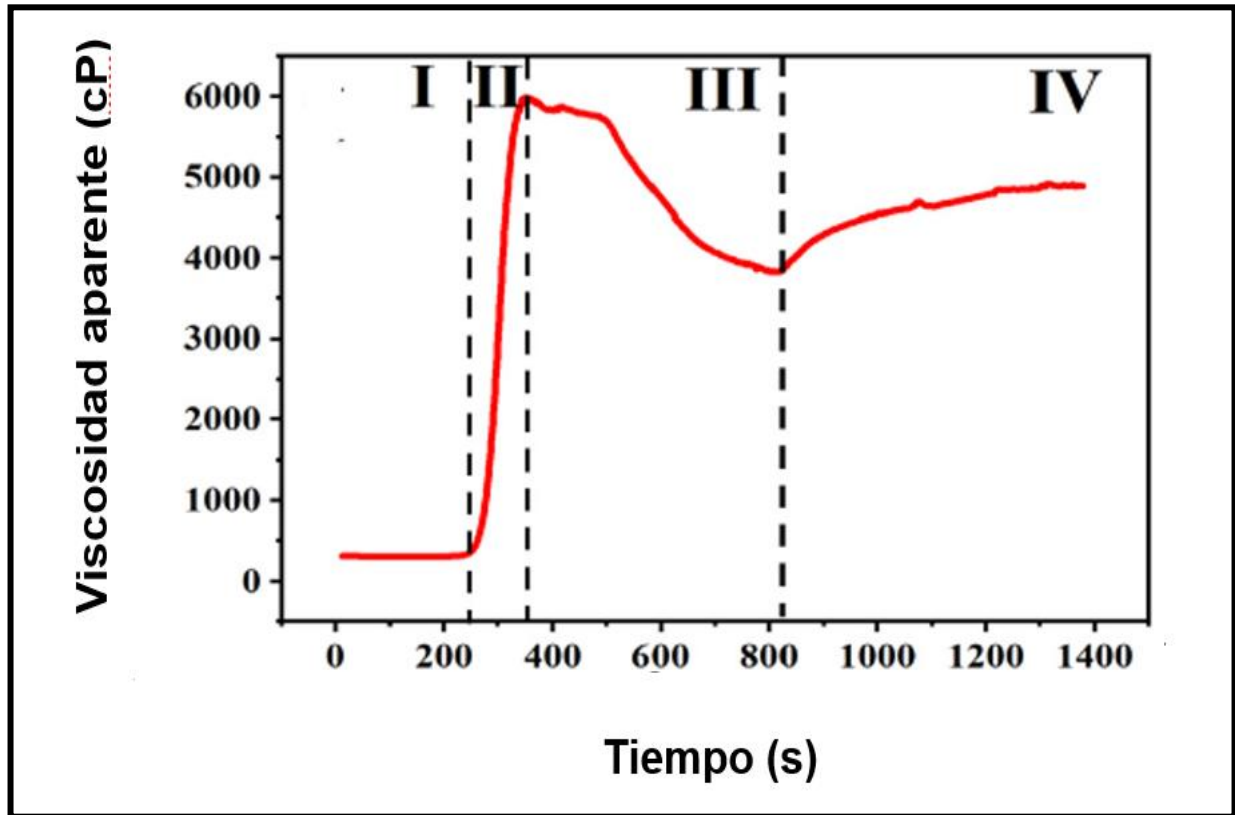


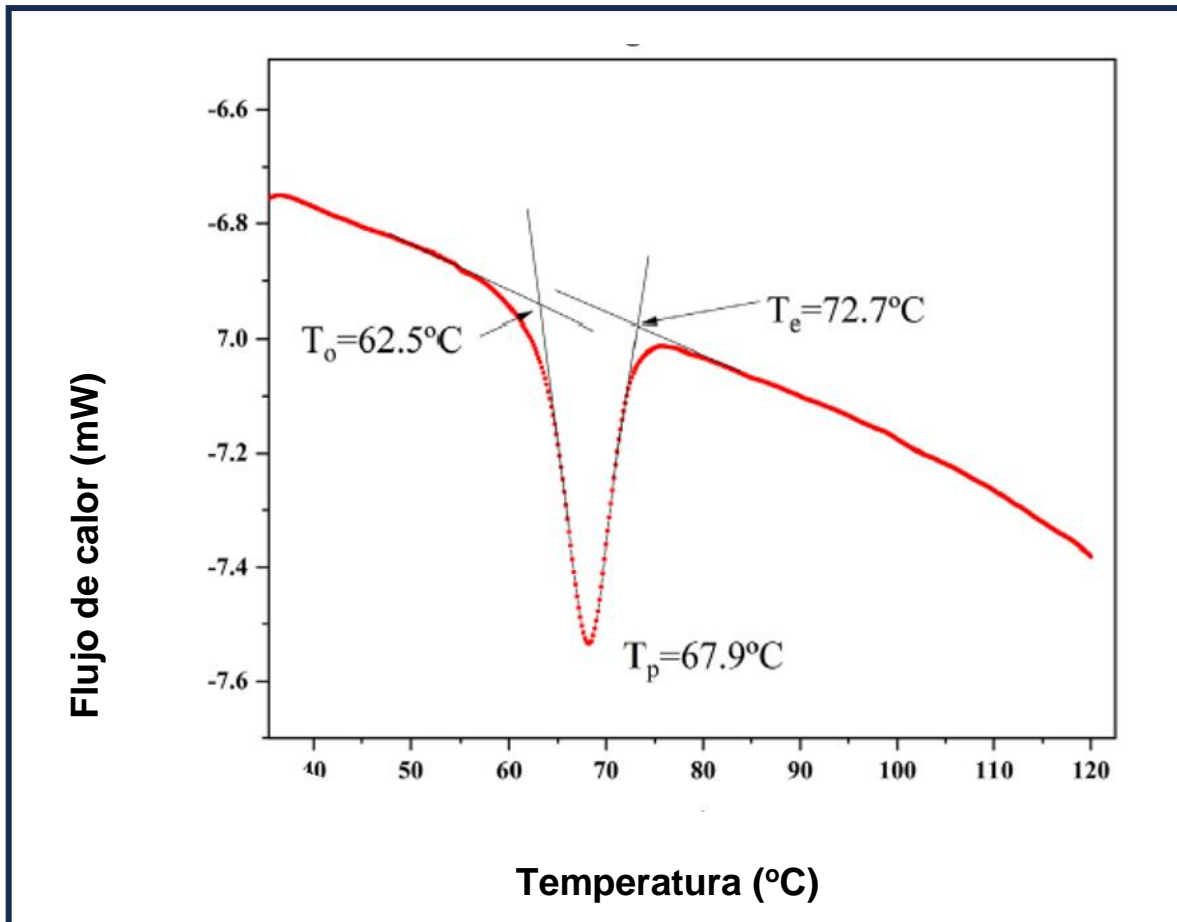
Figura 29 Perfil viscoamilográfico del almidón nativo

Durante un tiempo de 200 segundos en la suspensión de almidón la viscosidad aparente se mantuvo constante en un intervalo de temperatura de 32-55 °C, así se aprecia en la parte I. En la parte II, los gránulos del almidón se hinchan, pero permanecen enteros, la temperatura de mantiene también constante hay un aumento de viscosidad aparente durante 250 a 355 segundos porque hay un calentamiento en la suspensión, corresponde a un cambio brusco en el pasting, y sigue aumentando en este periodo hasta alcanzar el pico máximo del perfil de viscosidad o bien la gelatinización del almidón se completa (68.3 °C). Se presenta la exudación de amilosa y amilopectina. En estas regiones los nano cristales se solvatan, lo que indica que, durante la gelificación, se requiere energía para producir este fenómeno, que se refleja en una transición endotérmica que se va a identificar en DSC. El aumento de viscosidad aparente está asociado con una red desordenada producida por la constante rotación de la lechada como mencionan algunos investigadores (Oseguera-Toledo *et al.*, 2020)

En la tercera parte, en un período de 400-800 segundos hay un decremento en la viscosidad aparente producida por el enfriamiento de la suspensión. En este punto se representa la desvalorización de la viscosidad en la muestra debido a la pastificación, después de que experimenta un calentamiento permanente de 90 °C, y por último la parte IV. Como la pasta viscosa se enfría, la viscosidad aumenta debido a la formación de un gel que se mantiene unido por las interacciones intermoleculares que afectan a las moléculas de amilosa y amilopectina. En geles que contienen aproximadamente el 25 % de amilosa, las moléculas de almidón forman una red resultante en un gel firme, en contraste a los geles de almidón ceroso, que son suaves y contienen agregados, pero ninguna red. La retrogradación del almidón ha sido definida como el proceso que ocurre cuando las cadenas moleculares en los almidones gelatinizados comienzan a re-asociarse en una estructura ordenada, durante la retrogradación, la amilosa forma asociaciones de doble hélice de 40 a 70 unidades de glucosa, mientras que la cristalización de la amilopectina ocurre por una reasociación de las pequeñas ramificaciones más externas. Aunque ambas, la amilosa y la amilopectina son capaces de retrogradar, el componente de la amilopectina, aparentemente puede ser el mayor responsable (Jane et al., 2013).

### **3.6.2 Resultados en fenómeno de gelatinización del almidón nativo, mediante calorimetría diferencial de barrido para establecer el intervalo de temperaturas donde ocurre.**

La Figura 30 se presenta el termograma tomado al almidón aislado del amaranto nativo. Como se mostró anteriormente en la tabla del análisis químico proximal anteriormente, este almidón tiene muy bajo contenido grasa  $0.18 \pm 0.07$

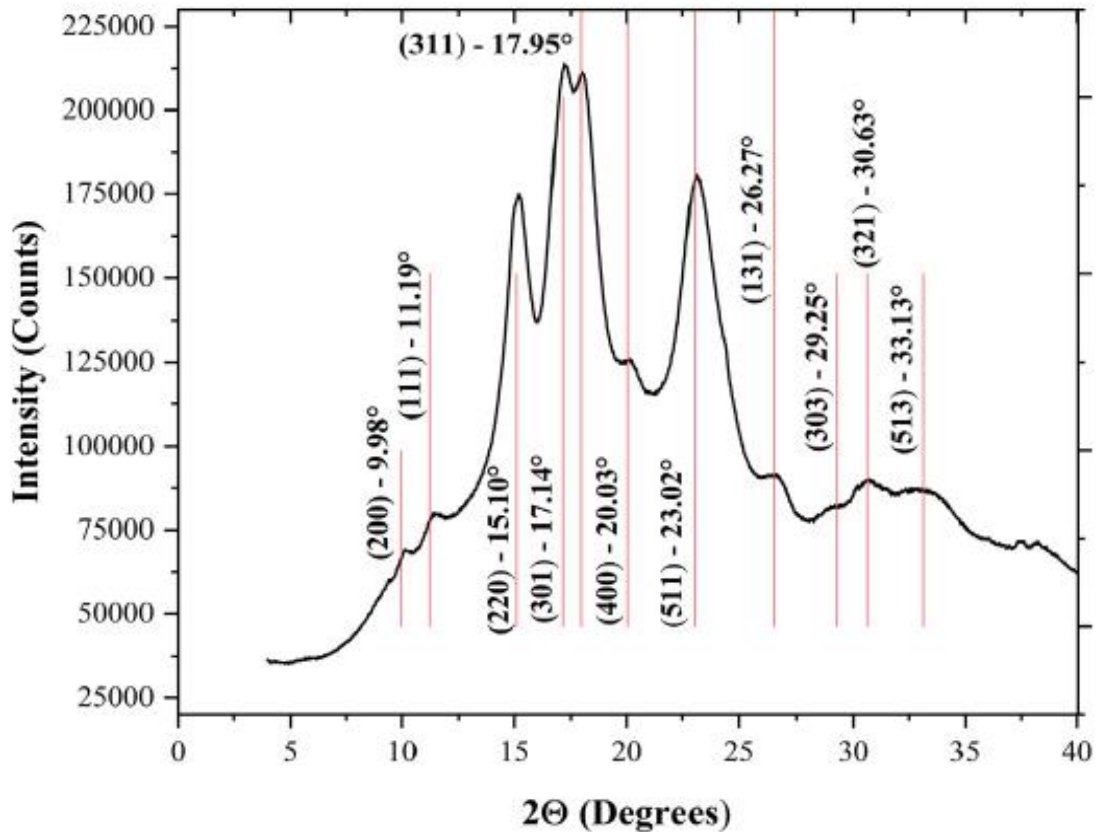


**Figura 30 Termograma del almidón nativo de amaranto**

La Figura 31 presenta el termograma característico del almidón de amaranto de aislado nativo. Como se mostró anteriormente, este almidón tiene  $0.26 \pm 0,17$  % de grasa, lo que indica contenido muy bajo en grasas. El intervalo de gelatinización fue de  $62.5^\circ\text{C}$  a  $72.7^\circ\text{C}$ . La temperatura de gelatinización máxima fue de  $67.9^\circ\text{C}$ , similar a la reportada por el pico máximo de viscosidad que fue de  $68.3^\circ\text{C}$  reportada por el Reómetro con celda de almidón y No se formó ningún complejo de lípido-amilosa durante el calentamiento, lo que indica que el proceso de aislamiento eliminó la grasa de manera eficiente. La entalpía de este almidón. fue de  $10.16\text{ J/g}$ , lo que sugiere la presencia de cristales altamente ordenados de acuerdo con lo reportado por Rincon-Londoño *et al*, (2016).

### 3.6.3 Resultados de difracción de rayos X. (Difractómetro de Rayos X)

La Figura 31 presenta el difractograma de Rayos X para el almidón aislado nativo de amaranto, es la mejor herramienta para obtener información alimentaria sobre las estructuras cristalinas presentes en los almidones.



**Figura 31 Difractograma de Rayos X para el almidón aislado nativo de amaranto**

En el caso del almidón, uno de los problemas es que una identificación correcta no acompaña a los patrones en términos de planos difractados y su indexación en relación con cualquier base de datos como es el caso del PDF 43-1518, reportado por Quintero-Castaño *et al.*, (2020) para una estructura ortorrómbica. La Figura muestra el patrón de difracción X de alta resolución de aislados de almidón de amaranto. La fase cristalina de este almidón es ortorrómbica, y el patrón corresponde a una estructura altamente ordenada. En cuanto a la interpretación de las propiedades térmicas del almidón que se presenta durante la gelatinización,

modifica sus patrones de difracción de rayos X en una suspensión de almidón y agua, la gelatinización la definen como una transición de orden-desorden.

Zobel *et al.* (1988) estudió la gelatinización correlacionando las propiedades estructurales y térmicas del almidón de maíz normal. Utilizando difracción de rayos X, mostraron la gelatinización del almidón como la fusión de cristalitos de almidón. Se observó la destrucción de la integridad de los cristalitos. Las líneas continuas negras en este patrón corresponden a la indexación de los picos más intensos (experimental), los planos difractados y la posición en escala  $2\theta$ . Como se puede ver, la indexación reportada por Quintero- Castaño *et al.* (2020) líneas en rojo coincide con estos picos, significa que la estructura cristalina monoclinica está presente en este almidón. Los números para algunos planos de difracción indican los planos conjugados. El patrón de difracción de rayos X del amaranto aislado está formado por picos amplios, que están relacionados con la contribución simultánea de la dispersión elástica e inelástica debido a los nanocristales monoclinicos ordenados como se señaló en Rondoño-Restrepo *et al.* (2019) y no se debe a la existencia de estructuras semicristalinas.



## Conclusiones

- El amaranto es un pseudocereal que contiene cantidades importantes de carbohidratos. El aislado de su almidón en una centrifuga de discos permitió una excelente eficiencia de separación con un mínimo de grasa y proteínas y un buen rendimiento para ser utilizado como un almidón nativo y ser modificado.
- El análisis térmico DSC mostró que este almidón tiene una temperatura de gelatinización baja, lo que facilita su manipulación como agente aditivo en alimentos listos para cocinar y por su buen aislamiento no forma complejos lipídicos.
- La composición química del almidón nativo reporto que este es rico en calcio y fosforo magnesio entre otros minerales importantes para la dieta.
- La viscosidad final presentada por este almidón es un valor bajo, se puede utilizar en formulaciones infantiles debido a su comportamiento suave como natilla y no presenta viscosidad dinámica.
- Las pruebas calorimetrías, las de viscosidad y difracción de rayos X mostraron que los valores del pico máximo de viscosidad se presentan ligeramente por debajo de 70 °C. para evidenciar la gelatinización del almidón.
- En Difracción de rayos X se encontró que la solvatación de los nanocristales ortorrómbicos se presenta durante la gelatinización del almidón y cambia los patrones de difracción. Además, no contribuyen al desarrollo aparente de la viscosidad. Este sería un tipo de almidón con gran aplicación al desarrollo de nanopartículas.

## Referencias Bibliográficas

- Alagara, P., Gallegos, J., Reyes, J. (2016). El amaranto y sus efectos terapéuticos. TLACTEMOANI. Revista Académica de Investigación. 2: 31-39.
- Amezquita, E., Chávez, L.F., Molina, D.L., Hoyos, P., Galvis, J.H. (2003). Susceptibility to comparison of improved soils (oxisols) in the Eastern Plains of Colombia. International soil Tillage Research organization Conference, Proceedings of ISTRO-16 Soil Management for Sustainability. Brisbane, Australia, 13-18. Pp 1-73.
- A.O.A.C. (2005). Official Methods of Analysis. 17th edition. Official Methods 925.10, 942.05 920.39, 965.17 y 920.15 Ed. by the Association of Official Analytical Chemists, Maryland, U.S.A.
- Arenas, A. J. A. (1999). Microscopia electrónica de barrido. México, D.F pp.13-35. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). UNAM.
- Atwell, W. A., Hood, L. F., Lineback, D.R., Varriano, E., Zobel, H. F. (1988). The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*. 33(3), pp. 306-311
- Atwell, W. A., Hood, L. F., Lineback, D.R., Varriano, E., Zobel, H. F. (1988). The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*. 33(3), pp. 306-311
- Barrios, E. S., Contreras, M. J., López, C. F. (2009). Estudio preliminar de modificación química de almidón de yuca mediante reacciones de carboximetilación asistida por microondas. Suplemento: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2(1), pp. 159-160.
- Bello, L., Contreras, S., Romero, R., Solorza, J., Jiménez, A., (2002), Propiedades química y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca* L. (Var. Macho), *Redalyc Agrociencia*, vol. 36, núm. 2.
- Biliaderis, C. G. (1991). The structure and interactions of starch with food constitues. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 69(1), pp. 60-78.
- Blanshard, J. M. V. (1987). Starch granule structure and function: a physicochemical approach. *Starch: Properties and potential*. 16-54
- Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D., Lilly, A. E. V. (1998). Operaciones de la ingeniería en alimentos (3a ed.). Zaragoza, España: Acribia.

- Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. *Biological Macromolecules*. 23, 85-112.
- Considine, D. M. y Considine, G.D. (1982). Foods and food production encyclopedia. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Conn E., Stumpf P., Bruening G., Doi R., (2000), Bioquímica Fundamental, Limusa Wiley. Pp. 27- 34.
- Dengate, H. N. (1984). Advances in Cereal Science and Technology. (6th ed.). Christchurch: New Zeland, (Chapter 2). pp 114-121.
- E., Juárez, E., Evangelista, S., Rosales, O., & Bello, Luis. (2013). Characteristics of maize starch and relationship with its biosynthesis enzymes. *Agrociencias*. 47, 1-12.
- Fennema, R. O. (2000). Química de los alimentos. Zaragoza: Acribia
- Fleche, G. (1985). Chemical modification and degradation of starch. En: Van Beynum, G. M. y Roel, J. A. (Eds.), Starch Conversion Technology (pp. 15-45). New York: Marcel Dekker Inc.
- Flores, F. (2004). Obtención de almidón con tamaño de partícula reducido mediante pulverizado mezclado con alta energía. Tesis para obtener el grado de Maestra en Tecnología Avanzada. IPN. Centro de investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. México. D. F.
- French, D. (1984). Organization of starch granules. En: Whistler, R. L., BeMiller, J.N., Pashchall, E.F. (Eds.), Starch: Chemistry and Technology (pp. 183-247). New York: Academic Press (London).
- García, M. L., Aguirre, J. A, Narro, J., Cortés, E., Rivera, R. J. G. (2007). Silo hermético para el control de plagas de granos almacenados en Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México*, 33(3), 231-239.
- González, R., Vera, A., Lerma, D. (2016). Estrategias de comercialización competitiva del amaranto en San Luis Potosí. *Revista de Análisis de Economía, Comercio y Negocios Internacionales*, 10(1), 71.
- Gutiérrez-Cortez, E., Hernández-Becerra, E. Londoño-Restrepo, S. M., Rodríguez-García, M. E. (2021) Physicochemical characterization of Amaranth starch insulated by mechanical separations International. *Journal of Biological Macromolecules* 177, 430–436.

- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate Polymers*. 45, 253-267.
- Hoover, R., Hughes, T., Chung, H. J., & Liub, Q. (2010). Composition, molecular structure properties, and modification of pulse starches: A review. *Food research international*. 43, 399-413.
- Irving, D.W. \_ Betschart, A.A. y Saunders, R.M. Morphological studies on *Amaranthus cruentus*, *Journal of Food Science* , 46:1170-1174, (1981)
- Jan, R., Seema., Saxena, D. C., & Singh, Sukhcharn. (2013). Pasting and thermal properties of starch extracted from *Chenopodium Album* Grain. *Agriculture and Food Science Technology*. 4(10), 981-988.
- Jonguitud, L., Gómez, C., Velázquez, G., Bustos, Z., Trejo, P., Morales, J., Castro, J., Fonseca, A. (2010). Efecto de la modificación ácida de almidón de maíz azul (*Zea mays*) con diferentes solventes acidificados con ácido clorhídrico sobre las propiedades térmicas y estructurales del almidón. *Revista Salud Publica y Nutrición*, 9(42), pp. 1-14.
- Karim, A. A., Toon, L. C., Lee, V. P., Ong, W.Y., Fazilah, A., & Noda, T. (2007). Effects of phosphorus contents on the gelatinization and retrogradation of potato starch. *Food Science*. 72 (2), 132-138.
- Karim, A.A., Norziah, H. M., & Seow, C. C. (2000). Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*. 71, 9-36.
- Konishi Y. y Yoshimoto N. (1989). "Amaranth Globulin as a Heat- stable Emulsifying Agent". *Agricultural and Biological Chemistry*, 53( 12): 3327-3328.
- Leloup, V. M., Colonna, P., Ring, S. G., Roberts, K., & Wells, B. (1992). Microstructure of amylose gels. *Carbohydrate Polymers*. 18, 189-197.
- León-Martínez, F. M., Rodríguez-Ramírez, J., Medina Torres, L. L., Lagunas, L. M. y Bernad-Bernad, M. J. (2011) Effects of drying conditions on the rheological properties of reconstituted mucilage solutions (*Opuntia ficus-indica*). *Carbohydrate Polymers*, 84(1), pp. 439-445
- Light, J.M. (1990). Modified food starches: why, what, where, and how. *Cereal Foods World*, 35(11), pp. 1081-1092.

- Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L., Li, L. (2009). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in polymer science*. 34, 1348-1368.
- Londoño-Restrepo SM, Jeronimo-Cruz R, Millán-Malo BM, Rivera-Muñoz EM, Rodríguez-García ME (2019) Effect of the Nano Crystal Size on the X-ray Diffraction Patterns of Biogenic Hydroxyapatite from Human, Bovine, and Porcine Bones, *Sci Rep* 9(1):5915-5923.
- Luallen, T. E. (1988). Structure, characteristics, and uses of some typical carbohydrate food ingredients. *Cereal Foods World*. 33, 924–927.
- Mapes, E.C. (2015). Recopilación y análisis de la información existente de las especies del genero amaranthus cultivadas y de sus posibles parientes silvestres en México. Jardín botánico. Instituto de Biología UNAM. El amaranto. *Revista Ciencia*, 66(3), 8-15.
- Marín, H. (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 para acreditar Experiencia Educativa: experiencia recepcional. Universidad Veracruzana. Xalapa-Enriquez, Veracruz.
- Matías, G., Hernández, B., Peña, V., Torres, N., Espinoza, V., Ramirez, L. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus* spp). *Journal of Negative & Positive Results*, 3(6): 423-436.
- McClements, D. J. (2011). Edible nanoemulsions: fabrication, properties, and functional performance. *Soft Matter*, 7(2), pp. 297–316.
- Metz B., Kossen N. W. F., & Van Suijdam, J. C. (1979). The Rheology of mould suspensions. *Advances in Biochemistry Engineering*. 11, 103-156.
- Miller, B. S., Derby, R. I., & Trimbo, H. B. (1973). A pictorial explanation for the increase in viscosity of a heated wheat starch-water suspension. *American Association of Cereal Chemists*. 50, 271-280.
- Mollins, A. R. (1991). *Phosphates in Food*. Boca Ratón, Florida: CRC Press, Inc
- Morrison, W. R., Tester, R. F., Snape, C. E., Law, R., Gidley, M. J. (1993). Some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy and normal barley starches. *Cereal Chemistry*, 70, pp. 385-391.

- Nieto, C. 1990. El cultivo de amaranto (*Amaranthus spp*) una alternativa agronómica para Ecuador. INIAP, EE. Santa Catalina. Publicación Miscelánea N°52. Quito, Ecuador.
- Palma-Rodríguez, H.M. (2012). Caracterización de almidones de diferentes fuentes tratados con ácido para la encapsulación de vitamina C. Tesis Doctorado en Ciencias en desarrollo de productos bióticos. IPN. CEPROBI unidad Morelos, Yautepec, Morelos.
- Pérez, S., Bladwin, P. M., Gallant, D. J. (2008). Food science and technology. (3th ed.). West Lafayette, Indiana USA. (Capítulo 5).
- Preiss, J. (2008). Food science and technology. Biochemistry and Molecular Biology of Starch Biosynthesis. (3th ed.). West Lafayette, Indiana USA. (chapter 4).
- Quintero-Castaño V.D, Castellanos-Galeano FJ, Álvarez-Barreto CI, Lucas-Aguirre JC, Bello-Pérez LA, Rodríguez-García ME (2020) Starch from two unripe plantains and esterified with octenyl succinic anhydride (OSA): Partial characterization, Food Chem 315:126241-126246.
- Radley, (1976). Starch production technology. Londres, UK: Applied science publishers LTD.
- Restrepo, S. M., Rincón, N., Contreras, M., Acosta, A. A., Bello, J. C., Aguirre, Lucas., Quintero, V. D., Pineda, P., López, A. R., Rodríguez, M. E. (2014). Physicochemical, morphological, and rheological characterization of *Xanthosoma robustum* Lego-like starch. International Journal of Biological Macromolecules. 65, 222-228.
- Rincón-Londoño N., Vega Rojas L., Contreras Padilla M., Acosta Osorio A. A., Rodríguez García M. E. (2016). Analysis is of the pasting profile in corn starch: structural, morphological and thermal transformations Part I. *international Journal of Biological Macromolecules*, 91: 106-114.
- Rivas, G. M., Méndez, M. C. G., Sánchez, R. M. M., Núñez, S. C., Bello, P. L. (2008). Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y linterizado. *Agrociencia*, 42, pp. 487-497
- Robertson, K.R. (1981). The genera of the Amaranthaceae of the Southeastern United States. Journal. Arnold Arbor. 62 (3): 267-313.
- Robles, A.J. (2013). Elaboración de cereales de desayuno fortificados con harina de amaranto y frutas deshidratadas. Tesis de maestría. Tecnología, Control y

seguridad Alimentaria. Centro de Estudios Superiores de la Industria Farmacéutica. Pp. 17-34.

Rogers, J. (2010). RVA Super 4, installation and operation manual. Newport scientific. 57-59.

Rushton J. H., Costich E. W., Everett H. J. (1950). Power characteristics of mixing impellers. *Chemistry Engineering Progress*. 46, 395-404.

Sandoval, A., Rodríguez, E., Fernández, A. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Dyna rev.fac.nac.minas*. 72(146), 45-53.

Satin, Morton. Functional properties of starches. FAO, Agricultural and Food Engineering Technologies Service. <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/AGRICULT/magazine/pdf/starches.pdf>. Vista el 2 de Marzo de 2020.

Serna-Saldívar, S. O. (2009). Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. México: AGT Editor. pp 68-73.

Shing, N., Shing, J., Kaur, L., Sing-Sodi, N, Sing-Gill, B. (2003) Morphological, thermal and rheological properties of starch from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81:219-231.

Silva, H., Cerqueira, M., y Vicente, A. (2011). Nanoemulsions for Food applications: development and characterization. *Food and Bioprocess Technology*, 5(3), pp. 854-867.

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

Srichuwong, S., and Jane, J. (2007) Physicochemical properties of starch affected by molecular composition and structures: a review. *Food Science and Biotechnology*.

Suriñach, S., Baros, M. D., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera, M. T. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la ciencia de materiales. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. 31(1), 11-17.

- Szymczyk, W., Boczkowska, A., Niezgoda, T., Zubko, K. (2008). FEM simulations of a magnetorheological elastomer with consideration of magneto mechanical coupling. Poster at the E-MRS Fall Meeting.
- Tester, R. y Karkalas, J. (2002). Polysaccharides II. Polysaccharides from eukaryotes. En: Vandamme, E. J., De Bates, S., Steinbuchel, A. (Eds.), *Starch in biopolymers* (pp. 381-438). Weinheim: Wiley-VCH.
- Tester, R., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal science*. 39, 151-165
- Thomas, D. J. & Atwell, W. A. (1999). *Starches*. St. Paul, U.S.A: Eagan Press.
- Vandeputte, G. E., Derycke, V., Geeroms, J., Delcour, J. A. (2003). Rice starches II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. *Journal of Cereal Science*, 38, 53-59.
- Villareal, M. E., Ribotta, P. D., Iturriaga, L.B. (2013) Comparing methods for extracting Amaranthus starch and the properties of the isolated starches, *LWT- Food Science and Technology*, **51**(2): 441-447
- Wajira, R., & David, J. (2007). A new insight into the gelatinization process of native starches. *Carbohydrate polymers*. 67, 511-529.
- Whistler, R. L., BeMiller, J.N., Paschall, E.F., (1984). *Starch: chemistry and technology* (2a ed.). Londres: Academia Press Inc.
- Wurzburg, O.B. (1989). *Modified starches: properties and uses*. Florida, U.S.A: CRC Press, Inc.
- Xie, X., Liu, Q., Cui, S. W. (2005). Starch modifications and applications. En: Cui, S. W., *Food Carbohydrate* (pp. 362-409). Boca Ratón, Florida: CRC Press.
- Zambrano-Zaragoza, M. L., Mercado-Silva, E., Gutiérrez-Cortez, E., Castaño-Tostado, E., Quintanar-Guerrero, D. (2011). Optimization of nanocapsules preparation by the emulsion-diffusion method for food applications. *LWT-- Food Science and Technology*, 44(6), pp. 1362–1368
- Zeta-Meter (1993). *Everything you want to know about Coagulation and Flocculation*. Virginia, USA: Zeta-Meter Inc.
- Zobel, H. F. (1988). Molecules to granules: a comprehensive starch: review. *Starch*. 40(2), 44-50.