



# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Centro Interdisciplinario de Investigación para  
el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de los  
Recursos Naturales

## **Caracterización físico-química de harinas de mezquite (*Prosopis Laevigata*)**

Tesis que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**Larissa Giovana Reyes López**

Directores de Tesis:

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

**Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**

**Mayo 2018**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 12:00 horas del día 20 del mes de marzo del 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:  
Caracterización físico-química de harinas de mezquite (Prosopis Laevigata)

Presentada por el alumno:

Reyes  
Apellido paterno  
Nombre(s) Larissa Giovana

López  
Apellido materno

Con registro: 

A	1	6	0	8	2	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Dr. Luis Gerardo Barriada Bernal

Dra. Luicita Lagúnez Rivera

Dr. Pedro Montes García

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca el día 11 del mes de mayo el año 2018, el (la) que suscribe Larissa Giovana Reyes López alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales con número de registro A160821, adscrito a Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Sadoth Sandoval Torres y Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas y cede los derechos del trabajo intitulado Caracterización fisico-química de harinas de mezquite (Prosopis Laevigata), al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección larijovi\_music@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Larissa Giovana Reyes López

Nombre y firma



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## Resumen

Los mezquites son arboles extremófilos presentes en regiones áridas del estado de Oaxaca, abundantes y poco aprovechados. A partir de las vainas de mezquite se pueden obtener harinas de interés para el consumo por personas con padecimiento de enfermedad celiaca. Además, de que las vainas poseen un alto valor nutritivo. La harina de mezquite es un producto natural que en la antigüedad fue empleado por los pueblos indígenas para la preparación de panes, atoles, jarabes y como remedio medicinal (Figuereido,1990).

Para comercializar la harina de mezquite es necesario caracterizar el proceso de molienda y las propiedades fisicoquímicas de los polvos, pues es necesario tener información sobre sus propiedades morfológicas, nutricionales y de estabilidad.

En el presente trabajo se recolectaron vainas de mezquite de la población de Santiago Sulchiquitongo, Oaxaca. El periodo de recolección fue en los meses de abril a junio del 2016. Previa selección y limpieza, las vainas fueron secadas a 60°C, HR 10% y velocidad del aire de 2.6 m/s. Posterior al secado, las vainas fueron procesadas por dos métodos de molienda: Por licuadora Osterizer y por pulverizador de leguminosas. Los polvos obtenidos se tamizaron por malla #60, y fueron caracterizados por diferentes métodos.

Se determinó su composición nutricional, se obtuvieron imágenes de su microestructura por microscopia de barrido electrónico, se obtuvieron las isothermas de adsorción a diferentes temperaturas, se obtuvo la distribución de tamaño de partícula e información de la estabilidad térmica de las harinas por calorimetría diferencial de barrido.

El análisis de granulometría revela que las partículas obtenidas por molienda en pulverizador son más homogéneas que aquellas obtenidas por molienda en licuadora y que su tamaño promedio es de 148 micras. Las harinas revelaron isothermas de tipo II, y fueron simuladas con el modelo GAB, con lo cual se calculó el calor isostérico de sorción. Las imágenes de microscopia muestran que las morfologías de los dos métodos de molienda son diferentes. Las partículas de la molienda por licuadora son más irregulares, mientras que las partículas por pulverizador son más redondeadas y uniformes. Los termogramas mostraron que las harinas son muy estables térmicamente de 0-130°C y que las fusiones son debidas principalmente a las variaciones en el contenido de humedad.

## Abstract

The mezquites are extremophiles trees present in arid regions of the state of Oaxaca, abundant and little used. Meals of interest can be obtained from the mesquite pods for consumption by people suffering from celiac disease. In addition, the pods have a high nutritional value. Mesquite flour is a natural product that in ancient times was used by indigenous peoples for the preparation of breads, atoles, syrups and as a medicinal remedy (Figuereido, 1990).

To market the mesquite flour, it is necessary to characterize the grinding process and the physicochemical properties of the powders, since it is necessary to have information about its morphological, nutritional and stability properties.

In the present work, mesquite pods were collected from the population of Santiago Sulchiquitongo, Oaxaca. The collection period was in the months of April to June 2016. After selection and cleaning, the pods were dried at 60°C, HR 10% and air speed of 2.6 m/s. After drying, the pods were processed by two milling methods: By Osterizer blender and by Pulverizer of legumes. The obtained powders were screened by # 60 mesh, and were characterized by different methods.

Its nutritional composition was determined, images of its microstructure were obtained by electron scanning microscopy, the adsorption isotherms were obtained at different temperatures, the particle size distribution and information of the thermal stability of the flours were obtained by differential scanning calorimetry.

The granulometry analysis reveals that the particles obtained by pulverizing the pulverizer are more homogeneous than those obtained by grinding in a blender and that their average size is 148 microns. The flours revealed isotherms of type II, and were simulated with the GAB model, with which the isosteric heat of sorption was calculated. The microscopy images show that the morphologies of the two milling methods are different. The particles of grinding by blender are more irregular, while the particles by spray are more rounded and uniform. The thermograms showed that the flours are very thermally stable from 0-130°C and that the fusions are mainly due to variations in moisture content.

## **Agradecimientos**

*A dios, por permitirme terminar este proceso de aprendizaje.*

*A CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de maestría y al Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR, IPN, Unidad Oaxaca) por darme la oportunidad de superarme personalmente.*

*A mi familia, por estar a mi lado, apoyandome y orientandome a cada momento.*

*A mi mama, papa y hermana por darme su amor infinito, consejos y constante comprensión cada día.*

*A Daniel, por su amor, por estar a mi lado, superando cada paso en esta travesía, mi amor, compañero y amigo en todo.*

*Al Dr. Sadoth Sandoval Torres, Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas (Directores de tesis), Dr. Juan Rodriguez Ramirez y Dr. Gerardo Barriada Bernal, por su enseñanza, apoyo y recibimiento.*

*Al maestro Frank, y las maestras Laura y Marlene, que durante la maestría me ayudaron con su conocimientos y experiencias para el seguimiento de esta investigación.*

*Gracias siempre*

# Tabla de contenido

Nomenclatura .....	iii
Índice de figuras .....	iv
Índice de tablas .....	vi
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del arte .....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación .....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos .....	6
<b>Capítulo 2. Marco referencial .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 El mezquite y su composición .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Generalidades.....	7
2.1.2 El mezquite en México.....	7
2.1.3 Especie <i>Prosopis laevigata</i> .....	8
2.1.4 Estructura de la vaina de mezquite .....	9
2.1.5 Estado de madurez .....	11
2.1.6 Composición nutricional de la vaina de mezquite .....	11
2.1.6.1 Mesocarpio.....	12
2.1.6.2 Endocarpio .....	12
2.1.6.3 Semillas.....	12
<b>2.2 Obtención de harina de mezquite.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Procesamiento de vainas de mezquite .....	13
2.2.2 Molienda.....	13
2.2.3 Tamizaje.....	14
2.2.4 Rendimiento de harinas .....	15
2.2.5 Clasificación de harinas .....	15
2.2.5.1 Granulometría de harinas .....	16
2.2.5.2 Harinas según sus características fisicoquímicas .....	16
2.2.5.3 Harinas según sus características organolépticas .....	17
2.2.5.4 Harina de mezquite o algarroba.....	17
<b>2.3 Almacenamiento y conservación de harinas .....</b>	<b>18</b>
2.3.1 Tipos de almacenamiento.....	18
2.3.1.1 Condiciones de almacenamiento.....	19
<b>2.4 Caracterización fisicoquímica de harina de mezquite .....</b>	<b>19</b>
2.4.1 Características de polvos de alimentos .....	19
2.4.1.1 Propiedades físicas de los polvos .....	19
2.4.1.2 Propiedades químicas de los polvos .....	26
<b>Capítulo 3. Materiales y métodos .....</b>	<b>35</b>
3.1. Diseño experimental .....	35
3.2. Obtención de harina de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) .....	36
3.3. Rendimiento de harinas de mezquite.....	36
3.4. Determinación química proximal de harinas de mezquite .....	37

3.4.1. Contenido de humedad .....	37
3.4.2. Proteínas totales .....	37
3.4.3. Azúcares reductores totales .....	37
3.4.4 Lípidos totales .....	37
3.4.5. Determinación de fibra cruda.....	38
3.4.6. Determinación de cenizas .....	38
3.4.7. Prueba de Shapiro-Wilk y T-Student .....	38
<b>3.5 Determinación de isothermas de sorción .....</b>	<b>39</b>
3.5.1. Método estático gravimétrico.....	39
3.5.2. Modelado de las isothermas de adsorción .....	40
3.5.2.1. Modelo BET.....	40
3.5.2.2. Modelo GAB .....	41
3.5.2.3. Caracteres termodinámicos de sorción .....	41
<b>3.6. Determinación de calor isostérico de sorción .....</b>	<b>42</b>
<b>3.7. Determinación de propiedades físicas fundamentales .....</b>	<b>44</b>
3.7.1. Morfología de partículas .....	44
3.7.2. Distribución de tamaño de partícula .....	44
3.7.3. Angulo de reposo y fluidez .....	44
<b>3.8. Determinación de propiedades térmicas de harinas de mezquite .....</b>	<b>45</b>
3.8.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) de harinas .....	45
3.8.1.1. Preparación de la muestra de harina.....	45
3.8.1.2. Preparación de muestras de almidones, proteínas de mezquite y azúcares simples .....	45
3.8.1.3. Condiciones de operación del equipo de DSC para harinas de mezquite, proteínas de mezquite, almidones y azúcares .....	46
<b>3.9. Características reológicas de masas de trigo-mezquite: prueba adicional.....</b>	<b>47</b>
<b>Capítulo 4. Resultados y Discusión .....</b>	<b>47</b>
4.1 Harinas de mezquite y rendimientos .....	47
.....	49
4.2. Composición nutricional de harinas de mezquite .....	50
4.2.1. Prueba T-Student de harinas de mezquite.....	52
4.3. Isothermas de sorción.....	54
4.3.1. Modelo BET .....	55
.....	56
4.3.2. Modelo de sorción GAB .....	57
4.3.3. Modelo de sorción GAB con constantes entrópicas y entalpías de dependencia de temperatura.....	59
4.4 Calor isostérico de sorción .....	61
4.5 Morfología de harinas de mezquite .....	63
4.6. Distribución de tamaño de partícula .....	69
4.7. Angulo de reposo y fluidez .....	70
4.8. Análisis por calorimetría de harina de mezquite .....	71
4.8.1 Extracción de fracciones de almidón y proteína de harina de mezquite.....	71
4.8.2 Termogramas de harinas de mezquite por calorimetría.....	73
4.8.3. Termogramas de almidones, proteínas de mezquite y sacáridos.....	78
4.8.4 Comparación de termogramas de harinas de mezquite .....	82
4.8.5 Temperaturas de transiciones de fase y variaciones de entalpia .....	83
4.9 Características reológicas de masas de harina de trigo y mezquite: prueba adicional .....	85
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>86</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>	<b>88</b>



## Nomenclatura

$\bar{a}$  Tamaño promedio de partículas ( $\mu\text{c}$ )

$a_{pi}$  Tamaño promedio de partículas de una clase granulométrica ( $\mu\text{c}$ )

$n$  Tamaño de la muestra

$a_w$  Actividad de agua

**RMN** Porcentaje retenido en la malla  $n$  (%)

**RHM** Porcentaje de rendimiento de harina de mezquite (%)

$X$  Contenido de humedad (g de agua / g de sólido seco)

$X_{eq}$  Contenido de humedad en equilibrio (g de agua / g de sólido seco)

**C** Constante BET relacionada al calor de sorción de la monocapa

$k$  Constante relacionada con el factor de corrección de las propiedades de la multicapa y volumen líquido

**C** Constante Guggenheim relacionada a la ecuación de sorción de GAB

$X_m$  Contenido de humedad de la monocapa (g de agua / g de sólido seco)

$X_o$  Humedad inicial (g de agua / g de sólido seco)

$P_o$  Peso inicial de las harinas de mezquite (g)

$P_f$  Peso final de las harinas de mezquite (g)

**PN** Peso del producto retenido en la malla  $n$  (g)

**PI** Peso de la muestra inicial (g)

$P_v$  Presión de vapor de agua del alimento (Pa)

$P_w$  Presión de vapor del agua pura (Pa)

$H_1$  Entalpia molar de las moléculas adsorbidas en la primera capa ( $J/mol^{-1}$ )

$H_l$  Entalpia molar para la condensación del volumen líquido ( $J/mol^{-1}$ )

$\bar{X}_{RHM}$  Promedio de RHM (%)

$\bar{X}_{RMN}$  Promedio de RMN (%)

$H_m$  Entalpia molar de sorción de moléculas adsorbidas en la multicapa ( $J/mol^{-1}$ )

$K_o$  Constante tipo Arrhenius para expresar la temperatura de dependencia de  $k$

$q_l$  Función de partición de la molécula en el volumen mayor de líquido

$q_1$  Función de partición de la molécula en monocapa

$q_m$  Función de partición de la molécula en multicapa

$C_{go}$  Constante Tipo Arrhenius para expresar la temperatura de dependencia de  $C$

$\Delta H_{cg}$  Diferencia de entalpía entre monocapa y la multicapa ( $J/mol^{-1}$ )

$\Delta H_K$  Diferencia de entalpía entre el volumen de líquido y la multicapa ( $J/mol^{-1}$ )

$\Delta H_X$  Constante para expresar la temperatura de dependencia de  $X_m$  ( $J/mol^{-1}$ )

$R$  Constante de los gases ( $J/mol^{-1} K$ )

$T$  Temperatura (K)

$\lambda$  Calor latente de vaporización del agua pura a temperatura ambiente ( $J/mol^{-1}$ )

$q_{st}$  Calor isostérico neto de sorción ( $J/mol^{-1}$ )

$Q_{st}$  Calor isostérico total de sorción ( $J/mol^{-1}$ )

$\Delta H_{vap}$  Entalpia de vaporización del agua pura ( $J/mol^{-1}$ )

$\Phi_{rep}$  Angulo de reposo de polvos ( $^\circ$ )

$D_a$  Promedio de los tres diámetros de un montículo de polvo

$r^2$  Coeficiente de correlación

**S** Error estándar

$\Delta H$  Variación de entalpia de fase ( $J/mol^{-1}$ )

## Índice de figuras

Figura 1. Distribución geográfica de especies de mezquite en México.....	19
Figura 2. Vaina de mezquite de la especie <i>Prosopis laevigata</i> .....	20
Figura 3. Localización de las partes estructurales de la vaina de mezquite.....	21
Figura 4. Estructura de la semilla de mezquite.....	21
Figura 5. Diagrama de obtención de fracciones (harinas) de vainas de mezquite.....	24
Figura 6. Aplicaciones de molinos en la industria de alimentos.....	25
Figura 7. Tipos de propiedades de los polvos.....	31
Figura 8. Dimensión de tamaño de partícula.....	33
Figura 9. Montaje para hallar ángulo de reposo y/o velocidad de flujo.....	36
Figura 10. Curvas típicas de las isotermas de sorción de los alimentos.....	40
Figura 11. Diferentes tipos de isotermas de adsorción según S. Brunauer.....	41
Figura 12. Funcionamiento del DSC.....	44
Figura 13. Termograma de DSC con sus transiciones de fase.....	45
Figura 14. Etapas de caracterización de harinas de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ).....	46
Figura 15. Proceso de trituración en licuadora de vainas de mezquite secadas a 60°C y tamizadas en malla N° 60.....	60
Figura 16. Proceso de trituración en molino pulverizador de vainas de mezquite secadas a 60°C y tamizadas en malla N° 60.....	60
Figura 17. Harinas de mezquite obtenidas por un secado de vainas a 60°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.....	60
Figura 18. Harinas de mezquite obtenidas de secado de vainas a 60°C, molienda en molino pulverizador y tamizaje en malla N° 60.....	60
Figura 19. Isotherma de adsorción de harina de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) a 30, 35, 40 y 45°C.....	66
Figura 20. Ajuste de la ecuación BET lineal para harina de mezquite a 30 y 40°C.....	67
Figura 21. Ajuste de la ecuación BET lineal para harina de mezquite a 35 y 45°C.....	67
Figura 22. Isotherma de adsorción de harina de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) a 30,35,40 y 45°C, ajustadas al modelo GAB.....	69
Figura 23. Modelado de datos experimentales de sorción de harinas de mezquite a 30,35,40 y 45°C, por modelo GAB de sorción y GAB con 6 parámetros (constantes entrópicas y entalpías).....	71
Figura 24. Gráfico lineal para calor isostérico a temperaturas constantes de 30, 35, 40 y 45°C.....	72
Figura 25. Calor isostérico de sorción en función del contenido de humedad de harinas de mezquite a temperaturas constantes de 30, 35, 40 y 45°C.....	73
Figura 26. Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora(HML1).....	74
Figura 27. Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora (HML2).....	75
Figura 28. Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora (HML3).....	76
Figura 29. Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP1).....	77
Figura 30. Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP2).....	78
Figura 31. Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP3).....	79

Figura 32. Distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por molienda en licuadora.....	80
Figura 33. Distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por molienda en molino pulverizador.....	81
Figura 34. Determinación de ángulo de reposo y velocidad de flujo de harinas de mezquite.....	82
Figura 35. Extracciones de proteína, fibra y almidón de harina de mezquite con secado a 60°C y pruebas de Lugol a diferentes temperaturas.....	83
Figura 36. Prueba cualitativa de Biuret de harina de mezquite.....	83
Figura 37. Curvas de comparación de flujo de calor, reversibles y no reversibles de harinas de mezquite secadas a 50°C y 60°C.....	84
Figura 38. Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) con diferentes actividades de agua a 30°C.....	85
Figura 39. Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) con diferentes actividades de agua a 35°C.....	86
Figura 40. Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) con diferentes actividades de agua a 40°C.....	87
Figura 41. Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite ( <i>Prosopis laevigata</i> ) con diferentes actividades de agua a 45°C.....	88
Figura 42. Comparación de curvas de DSC de almidones de maíz no hidratados e hidratados en relaciones de 1:5 y 1:10.....	89
Figura 43. Comparación de curvas de DSC de almidones de maíz y almidones extraídos de mezquite.....	90
Figura 44. Comparación de curvas de DSC de proteínas de Albumina de Suero Bovino (BCA) y proteínas extraídas de mezquite.....	90
Figura 45. Comparación de curvas de DSC de azúcares de fructosa, D-glucosa y sacarosa.....	91
Figura 46. Comparación de termogramas de harinas de mezquite a 30,35,40 y 45°C y diferentes actividades de agua.....	92

## Índice de tablas

Tabla 1. Composición química de la vaina de <i>P. laevigata</i> y <i>P. glandulosa</i> .....	26
Tabla 2. Términos utilizados en la clasificación de polvos de alimentos.....	32
Tabla 3. Tamaños medios de partículas en productos alimenticios.....	32
Tabla 4. Definiciones generales de forma de partículas.....	34
Tabla 5. Caracterización del flujo de los polvos.....	36
Tabla 6. Zonas de las isoterms de sorción.....	40
Tabla 7. Diseño de experimentos.....	46
Tabla 8. Actividad de agua de sales para isoterms de sorción.....	51
Tabla 9. Rendimiento de harinas de mezquite con molienda en licuadora.....	58
Tabla 10. Rendimiento de harinas de mezquite con molienda en molino pulverizador.....	59
Tabla 11. Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 40°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.....	61
Tabla 12. Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 50°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.....	62
Tabla 13. Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 60°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.....	62
Tabla 14. Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 70°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.....	62
Tabla 15. Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 60°C, molienda en molino pulverizador y tamizaje en malla N° 60.....	63
Tabla 16. Prueba de Normalidad Shapiro Wilk de la composición nutricional de harinas de mezquite por molienda en licuadora y en molino pulverizador.....	64
Tabla 17. Prueba t para muestras relacionadas de la composición nutricional de harinas de mezquite por molienda en licuadora y en molino pulverizador.....	64
Tabla 18. Valores de equilibrio de adsorción de harinas de mezquite .....	65
Tabla 19. Parámetros del modelo BET para harina de mezquite.....	68
Tabla 20. Parámetros del modelo GAB para harina de mezquite.....	70
Tabla 21. Constantes entrópicas y entalpías de dependencia del modelo GAB para harina de mezquite.....	71
Tabla 22. Velocidad de flujo de harina de mezquite con molienda en licuadora...81	81
Tabla 23. Velocidad de flujo de harina de mezquite con molienda en molino pulverizador.....	82
Tabla 24. Recuperación de proteínas, almidón y fibra de harinas de mezquite a diferentes temperaturas.....	82
Tabla 25. Temperaturas de transición de fase y variaciones de entalpía para el termograma (a) de harinas de mezquite.....	93
Tabla 26. Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (b) de harinas de mezquite.....	94
Tabla 27. Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (c) de harinas de mezquite.....	94
Tabla 28. Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (d) de harinas de mezquite.....	94
Tabla 29. Características reológicas de masas de harina de trigo con harina de mezquite.....	95

# Capítulo 1. Introducción

El mezquite de la palabra Azteca “Misquiti” es una planta del genero *Prosopis*, que da como fruto una vaina proveniente de la familia de las leguminosas y comprende 44 especies alrededor del mundo (Rodríguez *et al*, 2014). Es un recurso valioso que se distribuye en zonas áridas, semiáridas y de clima cálido, teniendo múltiples beneficios para los habitantes de estas zonas (CONAZA, 1994). La mayor parte de las especies de mezquite existen en forma natural en varios estados del país, siendo abundante la especie *Prosopis Laevigata* en los estados del norte, centro y algunas partes del sur del país como Oaxaca (Estrada, 1993).

El fruto tuvo un importante papel en la alimentación de algunos pueblos indígenas; tales como harinas de los frutos secos con la que preparaban tortas o pasteles, así también como bebidas fermentadas y mieles (Figueiredo, 1990).

En los últimos años, algunos trabajos de investigación se han interesado en la obtención de harinas de vainas de mezquite y la determinación de sus propiedades nutricionales (Corona *et al*, 2014; Sciammaro *et al*, 2015; Cerón *et al*, 2015), sin embargo, en México la caracterización de dichas harinas se ha visto limitada. El conocimiento de las propiedades fisicoquímicas de harinas de mezquite puede mejorar la producción de harina de mezquite para una mayor estabilidad y vida útil de este alimento (Labuza, 1984; Peleg, 1983). En el siguiente trabajo de investigación se presentan las características físico-químicas de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) como un aporte a su desarrollo tecnológico alimentario.

## 1.1 Estado del arte

Para obtener una harina de vainas de mezquite para su consumo, es necesaria la caracterización del proceso de molienda y de las propiedades morfológicas, químicas y de estabilidad de sus partículas. Diversos autores han realizado estudios sobre el procesamiento de vainas de mezquite, tales como Meyer (1984), que realizó un trabajo de investigación sobre la molienda y el proceso de separación de vainas de mezquite en diferentes molinos de dos especies de *Prosopis velutina* y *Prosopis glandulosa*, diferenció las partes estructurales de las vainas molidas, concluyendo que el más viable de obtener fue la fracción del mesocarpio, no obstante esta parte estuvo sujeta a la formación de grumos debido a su higroscopicidad, lo que dificultó la separación.

Otro ejemplo de procesamiento de vainas es el de Grados y Cruz (1996), que trabajaron con *Prosopis pallida* y *Prosopis juliflora* para la obtención de polvos mediante una operación de secado al sol, y una molienda con un molino prototipo. El producto de la molienda fueron semillas, cáscaras de endocarpio abiertas, harina y fragmentos de pulpa del endocarpio; encontrando un 46% de sacarosa y 23° Brix en la harina. El autor menciona que para mejorar los polvos es necesario el estudio

de procesos de aglomeración y la capacidad de dispersión del polvo en leche, yogures y jugos.

Un estudio sobre la evaluación del contenido nutricional y utilización de harina de mezquite en productos de panificación (*Prosopis laevigata*) se realizó por Barba de la Rosa *et al*, (2006). Las harinas de vainas enteras de mezquite secadas a 60 ° C y 70 ° C fueron altas en triptófano e histidina. Las características funcionales de la harina de mezquite entera fueron similares a la harina de frijoles (*Phaseolus vulgaris*) y superiores a los de la harina de trigo integral (*Triticum spp.*). Los resultados de este trabajo sugirieron que la harina de vainas de mezquite podría usarse como un suplemento para consumo humano.

Sciammaro *et al* (2015), estudió la composición química y nutricional de las diferentes partes (vaina entera, pulpa, semilla) del fruto de *Prosopis alba* y su aplicabilidad en la elaboración de bocaditos dulces saludables. Las vainas se secaron en estufa de convección forzada a 80 °C, se molieron en un molinillo doméstico y se tamizaron con tamices de 1000  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$  (#35) (ASTM, 2013). Se determinó el contenido químico nutricional, polifenoles y antioxidantes. Los bocaditos dulces se formularon con semillas de chía, amaranto y quinoa; se utilizaron miel, azúcar y harina de algarroba como agentes endulzantes y aglutinantes. Se realizó un análisis de perfil de textura (TPA) y un análisis sensorial. Los autores encontraron que el nitrógeno total de la vaina fue significativamente superior (48%) al de la pulpa, sugiriendo que buena parte de la proteína se encuentra en la semilla. La ausencia de prolaminas (valor límite: 0.1 mg/100 g harina) en vaina y pulpa fue comprobada, se observó un alto contenido de azúcares totales (sacarosa, glucosa y fructosa) en la pulpa (70.7% p/p, base seca). Los bocaditos dulces fueron muy bien aceptados por los consumidores.

Por otro lado, el estudio de las isotermas de adsorción en harinas de mezquite, como parte de la caracterización de su estabilidad, conservación y almacenamiento fueron investigadas por Prokopiuk *et al* (2010), que obtuvieron isotermas de sorción de harinas de vainas de algarroba argentina (*Prosopis alba griseb*) maduras. Los datos de equilibrio para la construcción de las isotermas, se determinaron por el método estático gravimétrico y con soluciones saturadas de sal de actividad de agua ( $a_w$ ) conocidas. Las muestras de *Prosopis* (cruda y tostada) se mantuvieron a una temperatura constante de 5°C, 25°C y 45°C hasta peso constante. Se encontró que las isotermas de adsorción de agua obtenidas de harina cruda y tostada mostraron la forma Sigmoide tipo II, típico de la mayoría de productos alimenticios. Las curvas mostraron una disminución de la capacidad de adsorción de agua a mayor temperatura, sobre todo en la isoterma de harina con vainas tostadas.

León *et al* (2012), determinaron las Isotermas de sorción para harina de *Prosopis alba* y *niger*. Utilizaron el método isopiéstico con un intervalo de de  $a_w$  de 0.089-0.851 a 20°C; 0.076-0.836 a 30°C y 0.063-0.233 a 40°C. Las muestras se pesaron hasta el equilibrio (20-25 días). Las isotermas fueron modeladas adecuadamente utilizando la ecuación GAB y BET y ecuaciones basadas en la teoría de la compensación de entalpía-entropía. Se encontró que los valores de humedad (%)

base seca) están relacionados con los obtenidos por Prokopiuk *et al*, 2010 de *Prosopis alba* Griseb.

Otro ejemplo fue Ade *et al* (2016), que determinaron las isothermas de sorción de semillas de mezquite (*Prosopis africana* a las temperaturas de 20, 25 y 30°C por medio del método gravimétrico usando sales saturadas en un rango de  $a_w$  de 0.1-1, los datos se ajustaron utilizando cinco ecuaciones. Todas las muestras exhibieron las isothermas clásicas de adsorción y desorción sigmoideal de tipo II. Las semillas de *Prosopis africana* mostraron un efecto de histéresis. Los autores señalaron que, a bajas actividades de agua, las semillas tienen menos agua disponible para adsorber. La aplicación de las isothermas de sorción de las semillas almacenadas aumenta la longevidad de las semillas, lo que ayuda en la conservación genética.

La caracterización fisicoquímica de polvos alimenticios involucra la determinación de las propiedades químicas, morfológicas y de tamaño de partícula, reológicas, térmicas, etc., las cuales ofrecen información sobre su comportamiento y estabilidad, que constituye un control de calidad sobre los productos.

Alves da Silva *et al*, (2001) realizaron un estudio calorimétrico de una molienda fina y una molienda con el salvado de algarrobo (mezquite). Los termogramas de mezquite, se obtuvieron a 25-200°C y un calentamiento de 10°C/ min. Se encontraron curvas de gelatinización del almidón entre 54-60 °C, solamente en la molienda fina con secado a 55°C, mientras que curvas de vaporización del agua (humedad) se presentaron en todos los secados para la molienda con salvado entre 88-131°C, estas últimas debido a la característica heterogénea de la muestra.

Mom (2012), estudió las características estructurales, propiedades funcionales y color de harinas de *Prosopis alba*, *Prosopis chilensis* y *Prosopis flexuosa*, aplicando un proceso de secado a 40° C, 50° C, 60° C y 70° C, una molienda y mezclado para optimizar la calidad del producto. Para la determinación de la distribución de tamaño de partículas aplicó el método de dispersión dinámica de luz o DLS. Como parte de los resultados, se seleccionó la molienda <350 µm, para las tres especies de *Prosopis*. Se comprobó que el endocarpo constituido por fibras, impidió el correcto funcionamiento del equipo y deterioró las propiedades organolépticas de la molienda. El análisis para las tres especies, corroboraron que las harinas tienen altas capacidades de absorción de agua y grasa para su panificación. El autor propuso como aplicación alimentaria una mezcla de harinas libre de gluten, apta para celíacos.

Cerón *et al* (2015), realizaron un análisis del impacto de la madurez de la vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) en su composición fisicoquímica posterior a su transformación en un polvo. El estudio analizó los estados de madurez del fruto a través de la escala Pantone. Se determinaron características nutricionales y físicas como el color, textura y tamaño de partícula en cada etapa de madurez. Los resultados obtenidos indicaron que existen tres estados de madurez, definidos por el color de la vaina de mezquite los cuales son: verde, violácea y amarilla. Durante el proceso de molienda, el molino utilizado no permitió la fractura fina de la totalidad

de la vaina verde, debido a su mayor contenido de hemicelulosa y almidón. El derivado en polvo no cubrió con las especificaciones de la norma NMX-F-007-1982 en cuanto al tamaño de partícula (tamiz de 1 mm de abertura de malla) por lo cual no se pudo llamar harina. Se registraron diferencias significativas del contenido de proteína entre estados de madurez; obteniendo los valores máximos en la vaina violácea o madura ( $14.41 \pm 1.5$  g) que en la verde y amarilla.

Bigne *et al* (2016), realizaron una caracterización reológica y de la microestructura de masa compuesta con harina de trigo y mezquite (*Prosopis alba*). Se llevaron a cabo ensayos farinográficos, con mezclas de harina de trigo y proporciones de harina de mezquite de 15, 25, y 35%. Se demostró que el aumento de la cantidad de harina de mezquite y la disminución de la cantidad de agua formó masas menos cohesivas y elásticas. La masa compuesta mostró un comportamiento típico viscoelástico cuando se aumentó la proporción de harina mezquite en la mezcla. La adición de harina de mezquite condujo a una masa menos estable respecto a la masa control de harina de trigo, ya que disminuyó la formación de la red de gluten, lo cual se comprobó con el uso de microscopía de barrido. Los autores mencionan que el alto nivel de proteínas globulares y fibra en la harina de mezquite conduce a cambios en los atributos de textura de la masa.

## 1.2 Planteamiento del problema

Para procesar, almacenar y comercializar harinas de mezquite es necesario caracterizar sus propiedades fisicoquímicas, las cuales varían en cada especie y en cada región.

Las vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) son abundantes en algunas regiones del estado de Oaxaca, sin embargo, su aprovechamiento para consumo humano, es muy escaso, por lo cual es necesario generar información para la producción de harinas.

La Organización Tejiendo Alianzas A. C. y la comunidad de Santiago Sulchiquitongo, Oaxaca, han manifestado su interés en el aprovechamiento de las vainas, por lo cual es necesario analizar los métodos de molienda posterior al secado. Las partículas obtenidas del proceso de molienda deberán ser analizadas para identificar sus principales características y posibles usos. Las normas actuales establecen criterios para la clasificación de harinas, por lo cual es necesario identificar la morfología de partículas, distribución de tamaño de partículas, contenido nutrimental de las harinas, capacidad de adsorción de humedad y estabilidad térmica de los polvos.

Durante el proceso de molienda, se observan dos situaciones: una dificultad para triturar las vainas y una alta higroscopicidad de las partículas.



### 1.3 Justificación

La harina es uno de alimentos indispensables en la alimentación del ser humano por su alto contenido en energía. En la actualidad, las harinas de leguminosas constituyen una fuente alternativa e innovadora para la dieta de personas con celiaquía. La vaina del árbol de mezquite es una leguminosa altamente nutritiva en proteína y azúcares, que se encuentran en zonas áridas y semiáridas del país, con múltiples beneficios (Palacios, 2006). Las vainas de mezquite se encuentran distribuidas en el país en una superficie aprox. de 3.5 millones de hectáreas y una producción de 3000-4000 kg/hectárea (Rodríguez *et al*, 2014). Oaxaca al poseer un total de 194 municipios con zonas áridas y semiáridas (SAGARPA, 2015), el mezquite tiene presencia en una cuarta parte del estado, donde se estima que una familia puede recolectar de 25-30 kg de vaina por árbol y 200 a 250 kg diarios (CONAZA, 1994; CONAZA E INE, 2000).

El procesamiento de vainas de mezquite maduras para la elaboración de harinas, es una forma de aprovechar este recurso natural para su consumo humano (Felker *et al*, 2003). En la actualidad, existen algunas aproximaciones sobre el procesamiento de harinas de vaina de mezquite, sin embargo, la caracterización del producto se ha visto limitada. La caracterización de productos alimentarios sobre sus propiedades fisicoquímicas es uno de los aspectos principales en el aseguramiento de su calidad y el control del cumplimiento de los parámetros exigidos por los organismos de salud (Gimeno,2010).

Realizar una caracterización fisicoquímica de harinas de mezquite, generará información útil y tecnológica sobre el valor nutricional, su estabilidad, así como las características físicas de las partículas; las cuales podrán asegurar un mejor procesamiento, conservación y por ende la calidad del producto (Perry y Green, 2003). Por tanto, la aportación de dicho conocimiento, mejoraría el desarrollo de los procesos alimentarios.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*).

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Obtener harinas de mezquite y determinar el contenido nutricional.
- Determinar las isotermas de adsorción de harinas de mezquite con un ajuste al modelo GAB.
- Determinar el calor isostérico de sorción de harinas de mezquite.
- Determinar las propiedades morfológicas y de tamaño de partícula de harinas de mezquite.
- Describir termogramas (curvas) por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) de harinas de mezquite.

## Capítulo 2. Marco referencial

### 2.1 El mezquite y su composición

#### 2.1.1 Generalidades

El mezquite es un árbol o arbusto, que pertenece a la familia de las Leguminosae-Mimosoideae, del género *Prosopis spp.*, el cual se caracteriza por ser una especie botánica de plantas espinosas, que se encuentra en zonas áridas y/o semiáridas (Valenzuela *et al*, 2011). Existen en el mundo un total de 44 especies, las cuales abarcan su distribución en el Sureste de Asia (tres especies nativas), África tropical (una especie nativa) y América (40 especies), llegando en este último continente desde EE.UU. hasta la Patagonia, Argentina y Chile. En los Estados Unidos y México se distribuyen 8 especies, mientras que en América del sur 32 especies (Capparelli y Prates, 2015). Es conocida por ser una especie de clima árido, que crece durante los meses de julio a septiembre en grandes cantidades (Geilfus, 1994). Constituye un componente importante de la vegetación de zonas áridas y semiáridas, caracterizadas por la escasez de agua, la baja fertilidad de los suelos y, a menudo, la alta salinidad. Como estrategias para detener el avance de la desertificación, su presencia contribuye a la desalinización, minimiza el escurrimiento del suelo y controla la erosión (Mom, 2012).

En México el nombre mezquite proviene de la palabra Azteca “Mesquiti”, aunque en Sudamérica y España, el nombre vernáculo utilizado para las especies arbóreas de este género es “algarrobo”, mientras que otros países las denominaciones son diferentes como las siguientes: plumo de oro (Cuba); thacco o guarango (Perú); mancacaballo (Panamá); carbón (Costa Rica); trupillo (Colombia); cují (Venezuela); mezquite (Estados Unidos) (Simpson, 1977).

#### 2.1.2 El mezquite en México

El mezquite desde tiempos prehistóricos ha sido la legumbre más utilizada como fuente de alimento (Fagg y Stewart, 1994). De acuerdo a algunas investigaciones se han encontrado restos de frutos masticados en cuevas en el Valle Tehuacán en México de la especie *P. laevigata*, alrededor de 6500 a.C. (Smith, 1967); así también en los estados del norte de México, diversas tribus obtenían harina hecha a base de la pulpa de las vainas maduras (Meyer, 1984).

Los mezquites constituyen parte importante de la flora de México, alcanzando inclusive carácter predominante al norte del país y algunas partes del suroeste. Las zonas áridas y semiáridas de México representan más del 40% de la superficie total del territorio mexicano. En más de 3.5 millones de hectáreas se encuentran especies autóctonas y predominantes como: *P. juliflora*, *P. pubescens*, *P. palmeri*, *P. articulata*, *P. tamaulipana*, *P. laevigata*, *P. glandulosa*, *P. glandulosa Torreyana*, *P. velutina*, *P. vidaliana* (Rodríguez *et al*, 2014). En el estado de Oaxaca se encuentran dos tipos de especies: *P. laevigata* y *P. vidaliana* (Ffolliott *et al*, 1983).

En México el mezquite se distribuye en la vertiente del pacífico, desde Michoacán hasta Oaxaca y en la del Golfo en Nuevo León, Tamaulipas y el norte de Veracruz, en la depresión central de Chiapas y en las regiones altas centrales del país (Figura 1). Su distribución comprende casi todo el territorio mexicano, con excepción de las zonas montañosas, aunque su amplio rango ecológico le permite ser localizado en zonas con temperaturas medias que van de 20 a 29° C, con precipitaciones que oscilan entre 350 y 1 200 mm anuales; se le encuentra desde el nivel del mar hasta los 2 200 m de altitud; crece preferentemente en llanuras y bajíos, sobre suelos profundos (García *et al*, 2014).

La especie *P. laevigata* tiene mayor distribución geográfica en el territorio mexicano. Hacia el sur de su distribución esta especie fue introducida al Istmo de Tehuantepec, junto con la especie *P. vidaliana* (Palacios, 2006).



**Figura 1.** Distribución geográfica de especies de mezquite en México.

● *P. odorata*; ■ *P. glandulosa*; ▲ *P. laevigata*; ▲ *P. velutina*; \* *P. articulata*  
(Palacios, 2006).

### 2.1.3 Especie *Prosopis laevigata*

La especie *Prosopis laevigata* fue identificada por H. & B., esta especie es un árbol de hasta 12 m de altura, con un tronco por lo general de 30 a 60 cm; de corteza gruesa, y con un color café-negrusco. La copa del árbol es más ancha que alta; tiene ramas pilosas, las flores crecen en espigas de 5 a 10 cm de largo y de color café-amarillento, a veces rojizo. El fruto es una vaina de color paja o rojizo violáceo;

con forma de lomento drupáceo, alargado, recto o arqueado y espiralado en algunos casos de 10 a 30 cm de longitud, puede ser plano o cilíndrico en la madurez y contiene de 12 a 20 semillas (Conaza e INE, 2000).

Sistema de clasificación vegetal (Conaza e INE, 2000):

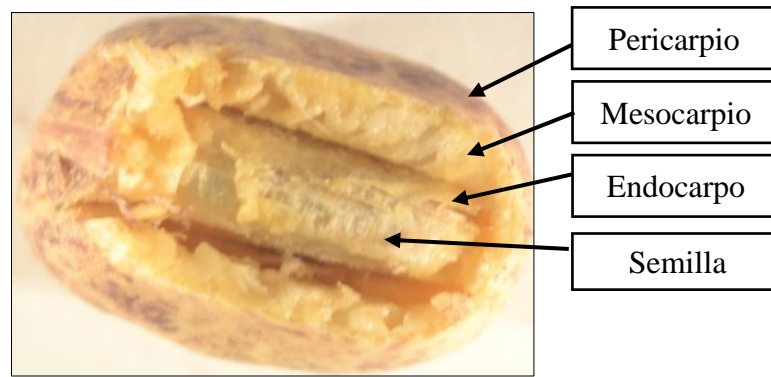
- Nombre común: Mezquite
- Reino: Plantae
- Familia: Fabaceae
- Género: *Prosopis*
- Nombre científico: *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)



**Figura 2.** Vaina de mezquite de la especie *Prosopis laevigata*.

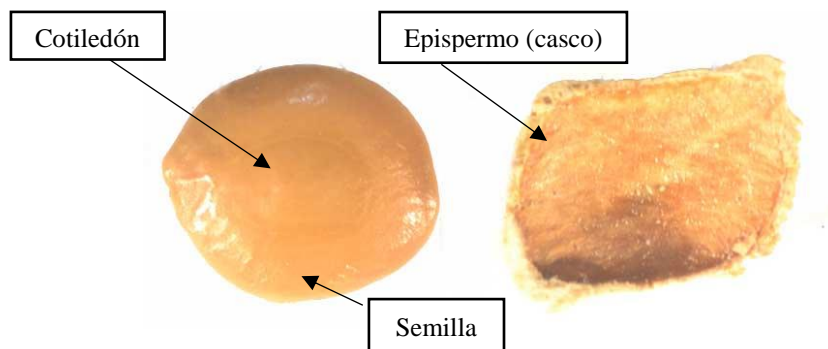
#### **2.1.4 Estructura de la vaina de mezquite**

Los frutos o legumbres del mezquite presentan una variada distribución de su estructura. La temporada de vainas de mezquite se extiende durante los meses de mayo a agosto. La vaina de mezquite está constituida por tres capas: la capa externa (pericarpio o exocarpo), la capa media o mesocarpo, la capa interna o endocarpo y la semilla (Figura 3). La parte de la vaina más profunda es donde se encuentran las semillas, las cuales están rodeadas de un casquillo o casco (epispermo) hasta su cotiledón (Figura 4).



**Figura 3.** Localización de las partes estructurales de la vaina de mezquite.

- **El pericarpio**, con fibras, es de color amarillo y/o rojizo con manchas violáceas. En el corte transversal, se observa una pared delgada y constituida por refuerzo de paquetes de fibras (Bravo y Saura, 1994).
- **El mesocarpio**, es carnoso, fibroso y azucarado, es comestible y nutritivo en la mayoría de las especies. Está constituido por un parénquima desarrollada (Bravo y Saura, 1994).
- **El endocarpio**, forma una estructura cerrada e indehiscente, de diferentes espesores, y su tamaño guarda una relación directa con el tamaño de las semillas. El corte transversal exhibe fibras lignificadas (Trobok, 1985).
- **Las semillas** son ovoides, comprimidas, resistentes, de color amarillo marrón. Presentan un endosperma rico en galactomananos y embrión con dos cotiledones (Mom, 2012). Las semillas presentan alto contenido de proteínas, en particular en *P. pallida* con 65 gramos de proteína por kilogramo de semillas (Bravo y Saura, 1994).



**Figura 4.** Estructura de la semilla de mezquite.

### 2.1.5 Estado de madurez

De acuerdo a Cerón *et al*, (2015), las vainas de mezquite se dividen en tres estados de madurez según la escala Pantone:

Estado de madurez I: vaina verde (Color verde limón, Escala Pantone 368).

Estado de madurez II: vaina madura (Color violáceo, Escala Pantone 437).

Estado de madurez III: vaina seca (Color amarillo, Escala Pantone 458).

### 2.1.6 Composición nutricional de la vaina de mezquite

La determinación de la composición químico-nutricional de un alimento comprende realizar métodos de análisis que puedan identificar la cantidad de nutrimentos de dicho alimento, tales como la humedad, proteínas, extracto etéreo, carbohidratos, fibras y cenizas (Ortiz, 2006).

La composición nutricional de las vainas de mezquite, aunque son similares entre especies, existe una pequeña diferencia en torno al suelo, sitio de la colecta de la vaina y/o lugar de crecimiento de las especies (Ruiz, 2011). En general, el fruto entero de *Prosopis* contiene: 11-17 % de proteínas y 13-34 % de azúcares, donde un 26-37% de proteína está concentrada en las semillas, y los azúcares en el pericarpio (Meyer *et al*, 1986).

La especie *Prosopis alba* tiene una cantidad de 71.7 g/kg sólido seco de proteínas, 21.7 g/kg sólido seco de grasas, 849.6 g/kg sólido seco de carbohidratos totales, 591.4 g/kg sólido seco de azúcares totales, 27.6 g/kg sólido seco de azúcares reductores, 24.3 g/kg sólido seco de fibra cruda y 265.6 g/kg sólido seco de fibra dietética total, también posee 1274.5 mg/kg de Calcio, Hierro con 450 mg/kg, Potasio tiene 8920 mg/kg y Magnesio con 967 mg/kg (Prokopiuk, 2004).

En cuanto a las especies de *Prosopis pallida* y de *Prosopis juliflora*, el azúcar principal es la sacarosa, el cual representa 46 g de sacarosa/ 100 g de la pulpa (endocarpio). La pulpa de la vaina de mezquite de esta especie, posee vitamina C, ácido nicotínico, pantotenato de calcio, y un contenido significativo de la vitamina E en la semilla. La fibra dietética de los cascotes de la pulpa y el endocarpio son fibra dietética insoluble (Sciammaro *et al*, 2015). En cuanto a la especie *Prosopis laevigata*, presenta un contenido de proteína de 10.28%, carbohidratos totales de 40.55%, fibra dietética de 14.19% y un 9.22% de humedad (Ruiz, 2011).

**Tabla 1.** Composición química proximal de la vaina de *Prosopis laevigata* y *Prosopis glandulosa* según diversos autores. (Reséndez, 2014)

Especie y autor	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteína (%)	Grasas (%)	Fibra (%)	Carbohidratos (%)
<i>P. laevigata</i> (Ramírez et. al., 2000)	3.00	3.00	12.00	5.00	25.00	52.00
<i>P. laevigata</i> (Ruiz, 2011)	9.22	4.20	10.28	3.90	16.88	48.10
<i>P. glandulosa</i> (Solorio, 2001)	7.41	4.98	13.27	1.99	25.27	47.08
<i>P. glandulosa</i> (Carrillo, 2006)	No determinado	3.15	20.15	1.95	23.90	50.86

### 2.1.6.1 Mesocarpio

El mesocarpio que corresponde a la parte de “pulpa” de la vaina de mezquite representa aprox. el 56% del peso total de la vaina entera (Cruz, 1999), siendo su mayor componente la sacarosa en un 46.1%, el cual representa cerca del 90% del total de azúcares solubles. En especies como *Prosopis glandulosa* y *Prosopis velutina* la vaina contiene 21.3% de sacarosa y 6.5% de azúcares reductores, mientras que en la especie *Prosopis alba* se encontró 59.14% de azúcares solubles totales y 27.6% de azúcares reductores (Prokopiuk *et al*, 2001)

### 2.1.6.2 Endocarpio

El endocarpio de la vaina de mezquite es una cápsula dura y fibrosa, la cual contiene a la semilla. Esta parte de la vaina posee la mayor cantidad de fibra, en comparación con las demás partes de la vaina. De acuerdo a Cruz, (1999), la especie *Prosopis pallida* tiene 92.3 g/100 g sólido seco de fibra dietética total, siendo mayor la fibra insoluble y solo 2.3 g/100 g sólido seco de proteína.

### 2.1.6.3 Semillas

En las semillas la concentración de proteínas varía considerablemente entre especies. Según Freyre *et al*, (2000), la semilla tiene un contenido de proteína de 312 - 393 g/kg de semilla, mientras que los cotiledones de las mismas contienen alrededor del 65 % de proteína (Cruz, 1999), y la aplicación de un tratamiento térmico incrementaría la calidad biológica de la proteína del cotiledón (Escobar *et al*, 2009). Sin embargo, a pesar del alto contenido proteico de las semillas, el uso industrial de los frutos, para consumo humano o animal, es prácticamente inexistente (Barba de la Rosa *et al*, 2006).



## 2.2 Obtención de harina de mezquite

### 2.2.1 Procesamiento de vainas de mezquite

La vaina de mezquite es una planta que tiene gran potencial de ser utilizada y procesada para diferentes productos alimenticios, tales como harinas, jarabes, sucedáneos de café, suplementos alimenticios, etc. El procesamiento involucra la separación de las partes del fruto, siendo la fracción de mesocarpio (pulpa) la que ofrece más posibilidades de aplicación, en forma de harinas o extractos (Cruz, 1999). Diversos investigadores han propuesto métodos de secado, molienda y tamizaje para la obtención de harinas del género *Prosopis*. Así también se han generado unidades procesadoras de tamaño semi-industrial que se han adaptado específicamente para procesar algarrobas. Se ha obtenido harina de pulpa, semillas y endocarpios, y se propusieron técnicas para una mayor separación de la semilla en endospermo, cotiledón y epispermo (Saunders *et al*, 1986; Meyer, 1984; Meyer *et al*, 1986). El proceso de obtención de una harina de mezquite sin aditivos o agregados artificiales, se lleva a cabo por una limpieza de vainas de mezquite, un secado mediante aire caliente o un secador solar, una molienda fina de las vainas, su tamizaje y almacenamiento. En el diagrama de la Figura 5 se muestran los pasos para la obtención de una harina de mezquite con un prototipo de molino elaborado en Perú, según Grados y Cruz (1996):

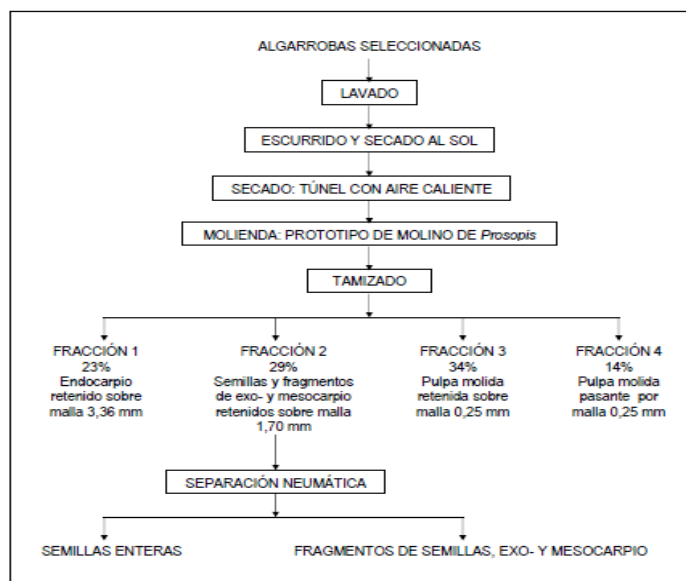


Figura 5. Diagrama de obtención de fracciones (harinas) de vainas de mezquite.

### 2.2.2 Molienda

La molienda es una operación que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. Es de amplia utilización en la industria de alimentos, especialmente en cereales y productos secos de origen vegetal. Las moliendas de

diferentes alimentos se pueden reducir hasta 0.5 mm, siendo el mayor grado de trituración. La reducción de tamaño puede ayudar a procesos de extracción de alimentos, a disminuir los tiempos de cocción, etc. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, rotamiento de cizalla y cortado (Ortegas, 2005). La pulverización o molienda fina se aplica para la obtención de alimentos secos de fácil reconstitución, y como presentación de productos que requieren de una dispersión muy homogénea (Ortegas, 2005). En muchas ocasiones el material debe molerse desde aglomerados de gran tamaño hasta polvo muy fino. Si un solo molino no es capaz de lograr la reducción deseada, entonces es necesaria una secuencia de equipos para lograr el objetivo. En la Figura 6 se muestran algunas aplicaciones de molinos en la industria de alimentos (Austin y Trass, 1996). Los molinos más utilizados para la obtención de harinas de granos y legumbres son:

**Molino de cuchillas:** Se utilizan fuerzas de corte para lograr la reducción de tamaño, se utilizan para dar principalmente partículas finas.

**Molino de martillo:** contiene un rotor de alta velocidad que gira dentro de una carcasa cilíndrica. La ruptura se da principalmente por fuerzas de impacto, algo de atrición es factible. Si se reemplazan los martillos por cuchillas, se puede moler material fibroso, y aún pegajoso.

	Molinos de gruesos a rodillos	Molinos de martillo	Molinos de atrición	Molinos de tambor
<i>Tamaño de molienda</i>				
Gruesos	●			
Intermedios	●	●	●	●
Finos/ultrafinos		●	●	●
<i>Aplicaciones</i>				
Chocolate	●			●
Cacao			●	●
Maíz (húmedo)			●	
Frutas secas		●		
Vegetales secos		●		
Granos	●		●	
Pimienta		●	●	
Sal		●		●
Especies		●		
Azúcar		●		●

**Figura 6.** Aplicaciones de molinos en la industria de alimentos. (Austin y Trass, 1996)

Para una adecuada molienda de vaina de mezquite, diversos autores han comprobado que es necesario una previa limpieza de las vainas con agua limpia y un secado hasta 6% de humedad, de manera que se pueda evitar una mayor adherencia y pegajosidad al molino durante este proceso. El molino de cuchillas es el de mayor aplicación para las vainas de mezquite por su alta velocidad de rompimiento de materias vegetales como los granos (Grados *et al*, 2000; Felker *et al*, 2003; Felker *et al*, 2013).

### 2.2.3 Tamizaje

El tamizado, es uno de los métodos de separación de mezclas, el cual consiste en la separación de partículas sólidas según su tamaño mediante un tamiz (red de

malla gruesa o fina, de acuerdo a su abertura). La malla se caracteriza a partir de una abertura especificada en pulgadas o milímetros, que es la abertura o el espacio que clasifica el tamaño de la partícula (Barbosa Cánovas *et al*, 2005). El material retenido sobre una superficie del tamiz es el de mayor tamaño, el que pasa por la superficie es de menor tamaño y el que pasa por un área cribadora y queda retenido en otra subsiguiente es el intermedio (Fellows, 2000). Después de una trituración de las vainas de mezquite, el producto pulverizado debe ser pasado a través de uno a tres tamices con el fin de separar la harina fina, por lo cual es posible cribar la molienda de mezquite mediante mallas desde #10 hasta #100, siendo esta última malla, la más utilizada para la obtención de un polvo fino (Grados *et al*, 2000).

#### **2.2.4 Rendimiento de harinas**

El rendimiento de harinas (RH) es una medida relativa que indica la cantidad obtenida de harina, basada en un 100% de harina total de referencia, después de ser molida y tamizada. También puede ser llamado porcentaje de extracción, el cual indica que por cada 100 Kg de una harina determinada se obtiene un porcentaje de harina extraída (IRAM 15854, 2010). El rendimiento de harinas se obtiene con la Ecuación 1:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Masa de muestra extraída}}{\text{Masa de muestra total}} \times 100 \quad (1)$$

El rendimiento de una harina puede verse influenciado por varios factores como dureza, contenido de humedad, tratamiento térmico, tamaño y forma, componentes químicos y nutricionales, cribado, entre otros. Cuando en general se habla del rendimiento de harinas, se trata del rendimiento neto de la misma, es decir la proporción de harina con a la harina total. El rendimiento sirve para determinar la proporción de extracción de un total de harina en base a sus características físicas, de molienda y tamizado; además esta medida facilita el procesamiento y producción en grandes cantidades. También sirve para indicar la calidad de la harina y la cantidad de harina que se puede obtener (IRAM 15854, 2010).

#### **2.2.5 Clasificación de harinas**

Se define como harina, al producto finamente triturado (polvo), obtenido de la molturación mínima de 80% de grano de trigo o de la mezcla de trigo blando y trigo duro, si se trata de harinas procedentes de otros vegetales, habrá que especificar la procedencia. Los granos deben estar maduros, sanos, limpios y enteros de tal manera que se obtenga un 73% de extracción de harina mínimo después de la molturación. La molturación del grano, incluye la trituración del mismo y su tamizado; el grano se criba, se descascarilla, se escoge y se limpia, excluyendo los granos extraños, y en ocasiones se lavan los granos antes de ser molidos (Requena, 2013). Una harina es considerada como un polvo fino resultante de la molienda de cereales, y estas son conocidas por ser una mezcla heterogénea de partículas de diferentes densidades y formas. Para que una harina pueda ser considerada como tal, se debe tener ciertas especificaciones a cumplir. Una característica importante de una harina es su contenido de humedad, donde la

humedad máxima que deben presentar las harinas grado I, grado II y grado III es de 14% (NMX-F-007-1982)

La harina es una materia básica en la elaboración del pan, pastas alimenticias y productos de pastelería. Para la clasificación de las harinas, estas se dividen en tres categorías o grados en base a su calidad y granulometría (NMX- 007, 1982):

- **Grado I:** Harina fina para panificación.
- **Grado II:** Harina semi-fina para galletas y repostería.
- **Grado III:** Harina común o estándar para pastas para sopa, spaguetis.

### 2.2.5.1 Granulometría de harinas

El análisis granulométrico de polvos secos puede hacerse mediante la observación directa o en un microscopio, asociada a un sistema de análisis de imagen, o las medidas por tamizado. La importancia de la granulometría se nota en la caracterización de los productos en polvo (Rhodes, 2008).

En relación a su granulometría, los grados de las harinas de granos varían entre:

- **Harina Grado I:** Este grado de harina no debe reportar retención en el tamiz N° 34 (de 0.177 mm de abertura de malla; equivalente a 80 U.S.B.S). Puede tener un máximo de 10 % de retención en el tamiz N° 50 (de 0.125 mm de abertura de malla; equivalente a 120 U.S.B.S). (NMX-007, 1982)
- **Harina Grado II:** No posee una retención de fracciones en tamices específicos, porque generalmente se utilizan mezclas variables de harinas de acuerdo al tipo de producto que se fabrique. (NMX-007, 1982)
- **Harina Grado III:** Debe tener un 73% como mínimo de retención de las fracciones de dos tamices: N°20 (de 0.297 mm de abertura de malla equivalentes a 50 U.S.B.S) y N°40 (de 0.149 mm de abertura de malla equivalentes a 100 U.S.B.S). (NMX-007, 1982)

### 2.2.5.2 Harinas según sus características fisicoquímicas

La clasificación de las harinas de granos viene determinada por sus especificaciones fisicoquímicas, las cuales son de la siguiente forma (NOM-007, 1982):

- **Grado I:** Humedad 14% máx., proteínas 9.5% mín., fibra cruda 0.2 - 0.4% y cenizas 0.55% máx.

- **Grado II:** Humedad 14% máx., proteínas 9.0% mín., fibra cruda 0.2 - 0.6% y cenizas de 0.4-1%.
- **Grado III:** Humedad 14% máx., proteínas 9.0% mín., fibra cruda 0.3% máx. y cenizas de 0.6% máx.  
(Todos los porcentajes están expresados sobre base húmeda de 14%)

### 2.2.5.3 Harinas según sus características organolépticas

**Color:** Las harinas de buena calidad presentan un color blanco amarillento, en las de mediana calidad el color es blanco mate y en las harinas de calidades inferiores, el color blanco empieza a empañarse de tonos rojizos. Sin embargo, dependiendo del color podemos identificar la procedencia de la harina, o la calidad de la misma. (Requena, 2013)

**Sabor:** El sabor de las harinas crudas presenta un sabor, un poco ácido, amargo o acre, que conforme va pasando su vida de anaquel tienden a un sabor dulce. (Requena, 2013)

**Olor:** El olor que nos indica que una harina está en buen estado, debe ser agradable y neutro. (Requena, 2013)

**Textura:** Las harinas que están en buen estado deben ser untuosas y uniformes al tacto, frescas y suaves. (Requena, 2013)

### 2.2.5.4 Harina de mezquite o algarroba

De acuerdo al Codex Alimentario Argentino, se entiende como harina de algarroba al producto de la molienda de las semillas, limpias, sanas y secas, del algarrobo blanco (*Prosopis alba griseb*) y/o algarrobo negro (*Prosopis nigra griseb*). Se establece que el producto debe estar libre de materias extrañas e impurezas y en perfecto estado de conservación. Su contenido en humedad no debe ser mayor de 10 % en base húmeda a 100° C - 105° C, y sus cenizas no excederán de 2.5 % a 500°C - 550° C. En el caso particular de la harina tostada, el contenido de agua no deberá superar el 5 % en base húmeda a 100° C - 105° C.

La harina del fruto (vainita completa con sus semillas) de algarrobo, se entiende como el producto de la molienda de los frutos completos limpios, sanos y secos, del algarrobo blanco (*Prosopis alba Griseb*) y/o algarrobo negro (*Prosopis nigra griseb*).

Se menciona a la harina de *Prosopis alba* como “algarrobo blanco” y *Prosopis nigra* “algarrobo negro”, para una posible obtención de harina de semilla y harina del fruto entero, no obstante, el código no hace especificación sobre la granulometría (FAO,2010).

## 2.3 Almacenamiento y conservación de harinas

### 2.3.1 Tipos de almacenamiento

La harina de mezquite es un producto higroscópico y por tanto tiene la capacidad de perder o ganar humedad, por ello es de gran importancia su lugar de almacenamiento. Para la conservación de las harinas y aumento de la vida de anaquel, existen diferentes formas de almacenamiento, algunas formas tradicionales de conservar las harinas son las siguientes:

1.- Almacenamiento en sacos: (de papel o con válvula de cierre): Una bolsa o saco de papel se define como un contenedor no rígido de papel con forma de tubo con uno o ambos lados sellados, con una abertura para introducir el producto. La frontera entre un saco y una bolsa es muchas veces difícil de determinar, ya que las bolsas muchas veces emplean diseños similares a los recogidos en la normativa para sacos. Normalmente se clasifican en dos grandes grupos, según el sistema de llenado, estos son de boca-abierta y de válvula.

El empleo de sacos de boca abierta frente a sacos de válvula viene dado principalmente por el tipo de producto que contendrán, empleando los sacos de boca abierta en producto granulosos. En cambio, cuando se envasan productos de menor tamaño o polvos finos como son harinas, azúcar, leche en polvo etc., se emplean sacos de válvula. (Vicente y Castrillón, 2015).

2.- Almacenamiento en silos: Cuando los contenidos de oxígeno del silo se llevan a 0.2 % del volumen, la mayoría de los organismos fúngicos responsables del deterioro mueren o permanecen inactivos. Los insectos no son capaces de sobrevivir si el contenido de oxígeno es menor al 2 %. Es esencial que una vez llenado el silo sea inmediatamente sellado, si este requerimiento se lleva a cabo (Vicente y Castrillón, 2015).

3.- Almacenamiento hermético: Consiste en guardar granos, semillas o productos de molienda de cualquier cultivo (maíz, frijol, trigo y garbanzo) en recipientes donde no hay intercambio de aire-gases con el exterior. (Hugo y Godiño, 2000). La bolsa plástica hermética es una herramienta que actúa como barrera contra la humedad y los gases debido a las propiedades del plástico multilaminado utilizado para su fabricación, lo que permite una inmejorable protección contra el ingreso de vapor de agua, a la vez que favorece y preserva altas concentraciones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y bajos niveles de oxígeno ( $O_2$ ) creados por el metabolismo de los insectos y la respiración de la semilla o del grano almacenado. El material también permite que pueda ser reutilizada y, si se llevan los cuidados adecuados, un tiempo de vida de hasta cinco años (Reyes y Ramírez, 2016).

### 2.3.1.1 Condiciones de almacenamiento

Algunas condiciones de almacenamiento de harinas de granos, cereales y leguminosas son las siguientes (Reyes y Ramírez, 2016):

- No almacenar la harina con humedad superior al 15%, ya que favorece la proliferación de insectos, provoca apelmazamiento en la misma y aparición de bloques en los sacos.
- Empaquetar en recipientes o bolsas herméticos.
- Almacenamiento en un lugar seco o en un desecador.
- La temperatura no debe superar los 18°C (evita deterioro de la harina, brinda una mejor calidad). A medida que la temperatura sube de 10°C a 26°C, la actividad de las plagas del almacén aumenta, y los ciclos de vida se reducen de ocho semanas a tres semanas.
- El contenido de agua del grano tiene que ser < 9% antes de que la actividad por insectos pare, y este grado de secamiento se puede lograr y mantener (Hugo y Godiño, 2000).

## 2.4 Caracterización fisicoquímica de harina de mezquite

### 2.4.1 Características de polvos de alimentos

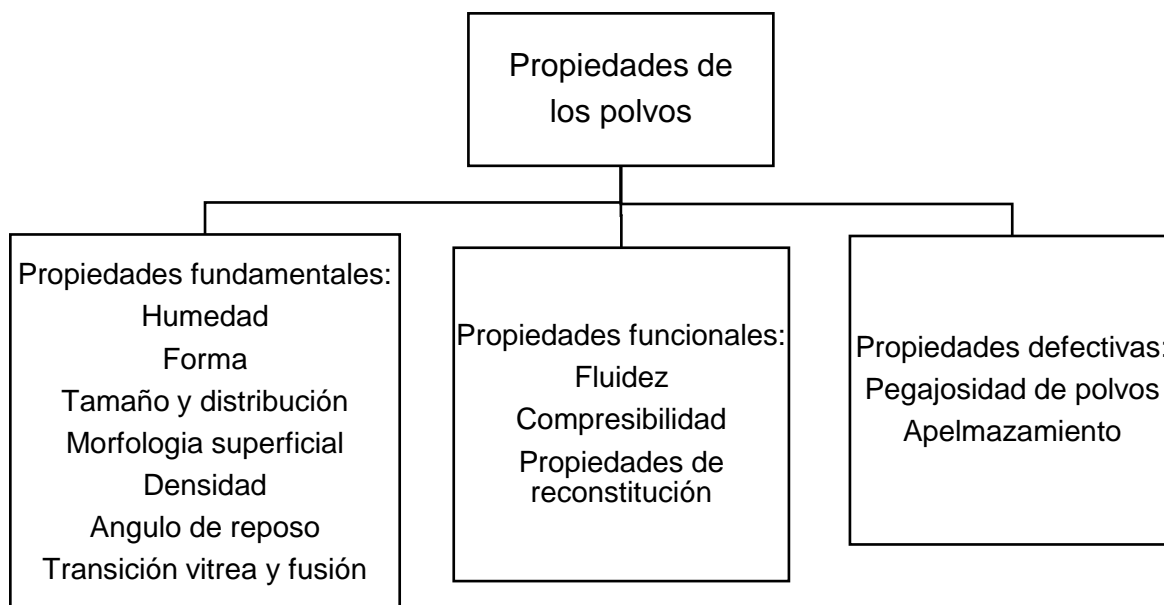
Un polvo se puede definir como un estado de división del producto, y se puede clasificar en simples y compuestos (Kresisch, 2016). Varias características individuales de partículas son importantes para las propiedades de un producto en polvo (Davies, 1984). Estas incluyen tamaño de partícula, forma, superficie, densidad, dureza, propiedades de adsorción, etc. De estas características, el tamaño y forma de las partículas es la más importante y esencial, debido a que se utiliza a menudo para clasificar, categorizar, y caracterizar un polvo.

#### 2.4.1.1 Propiedades físicas de los polvos

Los polvos tienen una superficie volumétrica y pueden ser higroscópicos (alto grado de absorción de la humedad). La estabilidad de un polvo, en términos de las propiedades físicas y químicas, suele verse afectada por una mayor absorción de la humedad (Bhandari y Hartel, 2005).

Las propiedades funcionales de los polvos pueden ser clasificadas en varias propiedades: **fundamentales, funcionales y defectivas** (Bhandari *et al*, 2013). Las

propiedades funcionales se relacionan a las propiedades en relación a su aplicación como un producto o ingredientes de productos que son influenciadas directamente por la combinación de propiedades fundamentales. Las propiedades defectivas no son propiedades deseables de los polvos, ya menudo restringen su uso para una aplicación particular (Figura 7).



**Figura 7.** Tipos de propiedades de los polvos. (Bhandari *et al*, 2013)

## I. Propiedades fundamentales

### Tamaño de partícula

Los polvos son partículas reducidas de los materiales sólidos, que presentan tamaños desde nanómetros hasta milímetros. El tamaño de partícula es un atributo físico importante de los alimentos, ya que se puede separar de los materiales extraños y evaluar la calidad de los alimentos. El tamaño de partícula es un aspecto crítico, por ejemplo, en la leche en polvo el tamaño de partícula debe ser grande para evitar aglomeración, pero lo suficientemente pequeño permitiendo la disolución rápida durante la reconstitución. Se ha encontrado que el tamaño de partícula es inversamente proporcional a la capacidad de dispersión del polvo y retención de agua de la proteína de leche (Barbosa-Cánovas *et al*, 2005).

La clasificación de tamaño de partícula de un producto de molienda se define de acuerdo a la separación de sólidos en dos o más fracciones. Es importante para la industria alimentaria ya que, cuando los alimentos se calientan o enfrían, la tasa de transferencia de calor está en parte determinada por el tamaño de partícula, y su variación podría causar un sobre-procesamiento o bajo-procesamiento. Así también, el alcance de un tamaño uniforme en los alimentos determina la aceptabilidad de un producto en los consumidores (Fellows, 2000).



Para que un material particulado se considere un polvo, su tamaño medio aproximado (50% del material es menor que el tamaño medio y el otro 50% del material es más grande) debe ser inferior a 1 mm (Barbosa-Cánovas *et al*, 2005). En las Tablas 2 y 3 se especifican los tamaños de partícula idóneos para los diferentes polvos según su aplicación en la industria alimentaria:

**Tabla 2.** Términos utilizados en la clasificación de polvos de alimentos.

Terminología	Tamaño de partícula (micras)	Ejemplos	Características
Polvo	50-200	Café, leche, colorantes.	Más cohesivos, alta densidad.
Gránulos	200-4000	Leche instantánea, café, semolina.	Fluidez libre, menor densidad.
Harina	100-5000	Harina de cereales, soya, etc.	Partículas de forma irregular, tamaños grandes y menor fluidez.
Polvo fino	5-100	Cualquier polvo	Más finos que el tamaño deseado.

Fuente: Handbook of food powders. (Bhandari *et al*, 2013)

En general, los polvos se caracterizan por ser "polvos finos", "gruesos" y "muy finos", de los cuales se han hecho varios intentos para estandarizar la nomenclatura de partículas en ciertos campos. Las partículas gruesas se pueden medir en centímetros o milímetros, mientras que las partículas finas en términos de abertura de malla, las partículas muy finas se miden en micrómetros o nanómetros. Un gran número de alimentos en polvo pueden ser considerados en el campo de polvos finos. (Barbosa Cánovas *et al*, 2005).

**Tabla 3.** Tamaños medios de partículas en productos alimenticios.

Alimento	Malla (B.S)	Micrómetros
Arroz y granos de cebada	6-8	2,800-2,000
Azúcar granulada	30-34	500-355
Sal de mesa	52-72	300-210
Cocoa	200-300	75-53
Azúcar en polvo	350	45

Fuente: International Organization for Standardization (ISO). (Barbosa-Cánovas *et al*, 2005)

### Distribución de tamaño de partícula

La distribución del tamaño de partícula de un material se expresa como la fracción de masa del material que está retenido en cada tamiz o el porcentaje acumulado de material retenido (Fellows, 2000). Se define como el porcentaje relativo en masa de cada una de las distintas fracciones de tamaños representados en la muestra. Permite evaluar la operación de cribado y se determina mediante un análisis completo de tamaños, utilizando tamices de prueba.

Las técnicas empleadas útiles para determinar la distribución de tamaño de partícula son: tamizado y difracción láser (Mom, 2012).

- Tamizado: Este método proporciona una distribución de masa y tamaño en base al diámetro de malla de cada tamiz. Como la longitud de la partícula no dificulta su paso por las aberturas del tamiz, el diámetro del tamiz depende del máximo ancho y máximo espesor de la partícula. Para valores menores a 20  $\mu\text{m}$  se realiza el tamizado con inyección de aire y para valores hasta 5  $\mu\text{m}$  se utiliza el tamizado húmedo en el cual la muestra de polvo es suspendida en un líquido.
- Difracción laser: Se basa en el fenómeno en la difracción de un haz de luz al pasar luz a través de una suspensión. Como las partículas de un líquido se mueven aleatoriamente (movimiento Browniano), la velocidad de ese movimiento es utilizado para determinar el tamaño de las partículas (Rhodes, 2008). Se pueden medir tamaños de partícula en el rango de 0,1 - 2000  $\mu\text{m}$  conociendo los índices de refracción del material y del medio dispersante. Este método proporciona las distribuciones (de frecuencia y frecuencia acumulada) de tamaño de partículas en base al volumen de las partículas. (Mom, 2012)

El tamaño promedio de las partículas se calcula mediante la Ecuación 2:

$$\bar{a} = \sum_1^n \frac{[a_{pi}(m-\%)i]}{100 n} \quad (2)$$

Donde  $a_p$  es el tamaño promedio de partículas de una clase granulométrica ( $i$ ) y  $(m - \%)i$  es su concentración en la muestra,  $n$  el número de clases granulométricas obtenidas en el análisis granulométrico.

Si las partículas tienen la misma dimensión, el tamaño lo especifica cualquier lado de la misma. En el caso de que sean partículas irregulares, es decir, tengan una dimensión más grande que otra, su tamaño se determina tomando en cuenta la "segunda dimensión" principal más grande (Figura 8) (Earle, 1988).



**Figura 8.** Dimensión de tamaño de partícula.

### Morfología de las partículas

La forma de las partículas define el comportamiento de las mismas y dependen del método empleado de molienda y tamizado para su obtención, así también del tipo

de material. Las partículas de los polvos alimenticios pueden ser amorfos, cristalinos o mezclados (semicristalinos) en su estructura de nivel molecular. De acuerdo a la molienda aplicada, los polvos se pueden observar en cualquiera de estas formas (Tabla 4). Los polvos en estado cristalino poseen una alineación molecular definida a largo plazo mientras que el estado amorfo está desordenado. Las propiedades de los polvos alimentarios, como es el caso de harinas vegetales, incluyendo su funcionalidad y su estabilidad, son altamente dependientes de estas estructuras. Muchas de las propiedades deseadas e importantes de los materiales alimenticios se pueden lograr alterando estas estructuras (Peschl, 1989).

**Tabla 4.** Definiciones generales de forma de partículas.

<b>Nombre de la forma</b>	<b>Descripción de la forma</b>
Acicular	Forma de aguja
Angular	Forma aproximadamente poliédrica
Cristalino	Forma geométrica libremente desarrollada
Ramificado	Forma cristalina ramificada
Fibroso	Regular o irregular en forma de hilo
Escamoso	En forma de placa
Granular	Forma irregular aproximadamente equidimensional
Irregular	Sin simetría
Modular	Forma irregular redondeada
Esférico	Forma global

Fuente: (Adaptado de Allen, 1981)

El análisis por microscopio electrónico de barrido (MEB) se basa en la medición de las partículas independiente de su forma, comparada con una escala patrón (micrómetro). Se debe de tomar un número de partículas representativas para el análisis. Las señales que se derivan de las interacciones electrón-muestra revelan información mediante una imagen bidimensional sobre la morfología externa (textura), composición química y estructura cristalina. Una ventaja del análisis MEB es que se considera una técnica no destructiva para la muestra, es decir, los rayos X generados por interacciones de electrones no conducen a pérdida de volumen de la muestra, por lo que es posible analizar repetidamente datos de los mismos materiales (Egerton, 2005).

### **Contenido de humedad**

El contenido de humedad de un alimento, hace referencia a la cantidad total de agua que contiene, sin identificar qué fracción del agua está ligada a otras sustancias, por tanto, no proporciona información exacta sobre el crecimiento microbiano, no obstante, esta propiedad tiene un efecto en el flujo de los polvos, su calidad y vida útil (Badui *et al*, 2006). El alto contenido de humedad de un polvo de un alimento tiende a formar aglomeraciones, y si su humedad es excesiva, las partículas llegan a pegarse a las paredes donde este depositado.

## II. Propiedades funcionales

### Fluidez

La fluidez de un polvo se define como el movimiento relativo de una mayor parte de las partículas, a lo largo de la superficie de pared del recipiente (Peleg, 1977). Los alimentos en polvo se pueden clasificar en diferentes categorías, en función de sus propiedades de manejo. Los polvos se clasifican de acuerdo con en el manejo de los sistemas de dispersión o de acuerdo con sus condiciones dinámicas o estáticas durante el transporte o almacenamiento. (Barbosa Cánovas *et al*, 2005)

Si un material tiene que ser almacenado o transferido, y presenta una mayor fluidez; no habrá complicaciones en su manipulación (Chen,1994). Sin embargo, si el material son partículas sólidas muy pequeñas; la cohesión, la fricción y la interacción entre partículas son factores que podrían complicar el manejo de estos sólidos.

Para los polvos finos y muy finos, las fuerzas de atracción entre las partículas son grandes, por lo que se definen como cohesivos. Los polvos cohesivos normalmente presentan problemas de flujo, porque son comúnmente relacionados con la liberación de sustancias adhesivas (por ejemplo, grasa) o a la presencia de un comportamiento higroscópico, temperatura y tiempo de consolidación. Las propiedades de superficie de las partículas, forma de las partículas, distribución de tamaño y la geometría del sistema, son factores que afectan a la capacidad de flujo de un polvo (Peleg, 1983).

Interacciones principales que pueden afectar el flujo de un polvo:

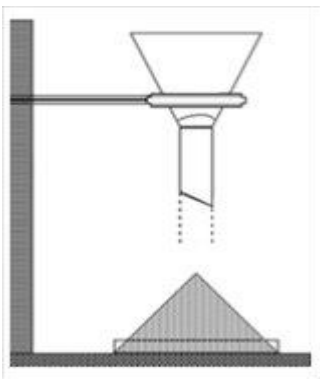
- 1) Fuerzas de fricción ( $\geq 150 \mu\text{m}$ ).
- 2) Fuerzas de tensión superficial.
- 3) Fuerzas mecánicas entre las diferentes partículas de forma irregular (tamaños grandes).
- 4) Fuerzas electrostáticas.
- 5) Fuerzas cohesivas de Van der Waals (polvos finos  $\leq 150 \mu\text{m}$ ) (Peleg, 1983).

Índice de Hausner: Es un método simple y rápido para predecir las propiedades de flujo de un polvo. La base del método utilizada para determinar este índice consiste en medir el volumen aparente no sedimentado  $V_0$  (volumen inicial), hasta un  $V_f$  (volumen final) obtenido al provocar la sedimentación del polvo hasta la obtención de un volumen constante (Ecuación 3) (Schulze,1996).

$$\text{Índice de Hausner} = \frac{V_0}{V_f} \quad (3)$$

Velocidad de flujo: La velocidad de flujo (g/s) se determina agregando cierta cantidad de material a un embudo con dimensiones fijas con el extremo tapado y se mide el tiempo que demora en caer el material desde que se destapa hasta el vertimiento total (Schulze,1996).

Ángulo de reposo estático: El ángulo de reposo se forma cuando se vacía un polvo sobre una superficie horizontal plana, el producto forma un montículo. Al ángulo formado por la horizontal y el talud es el ángulo de reposo. Hay diversos factores que influyen el ángulo de reposo, tamaño, forma, volumen, contenido de humedad y orientación de las partículas que conforman la masa del polvo (Ospina, 2002). Cuanto menor sea el ángulo que forma la pendiente con la horizontal, mejores serán las propiedades de flujo de los polvos (Tabla 5) (Shah *et al*, 2008).



**Figura 9.** Montaje para hallar ángulo de reposo y/o velocidad de flujo.

**Tabla 5.** Caracterización del flujo de los polvos.

Ángulo de reposo (°)	Características de flujo
Mayor de 50	Sin flujo libre
30 – 50	Poco flujo
Menor de 30	Flujo fácil

Fuente: (Shah *et al*, 2008).

Los factores que afectan el ángulo de reposo son:

- Forma: Las partículas esféricas tienen muy buen flujo, contrario a lo que sucede con las partículas que son muy irregulares. Por esta razón, es de esperarse que los polvos o granulados formados por partículas lisas o esféricas presenten ángulos de reposo muy pequeños y viceversa (Peschl, 1989).
- Tamaño: Si se toma el tamaño independiente de la forma y densidad de la partícula, se puede esperar que las partículas con tamaños inferiores a 75  $\mu\text{m}$  no fluyan libremente debido a su alta cohesión y que las partículas con tamaños en el rango de 250 -2000  $\mu\text{m}$  tengan muy buen flujo.
- Fuerzas de cohesión y de rozamiento: Estas influyen en la forma del cono, especialmente si se trata de partículas finas. Para disminuir esta cohesión y

- rozamiento, se utilizan algunos materiales llamados lubricantes que se adicionan al polvo o granulado en cantidades muy pequeñas (<5%).
- Humedad de equilibrio: Si es superior al 5% el flujo se restringe.

### **III. Propiedades defectivas**

#### **Aglomeración de polvos**

La mayoría de los materiales forman agregados o aglomerados que pueden ser muy cohesivos y afectan su compactibilidad. Esta cohesividad aumenta con la disminución del tamaño de partícula.

Los grados de asociación entre las partículas se clasifican (Bhandari *et al*, 2013)

1. Lamelar: Se muestran como placas apiladas.
2. Agregado: Es un conjunto de partículas adheridas entre sí.
3. Aglomerado: Está formado por partículas fusionadas o cimentadas.
4. Conglomerado: Es una mezcla de dos o más tipos de partículas.
5. Esférula: Está formada por partículas agrupadas en forma de racimos.
6. Incrustación: Está formada por partículas grandes con incrustaciones de partículas más pequeñas.

Los cambios en el sistema de partículas dependen de la temperatura, humedad y posición de partículas en el polvo, esto implica muchas etapas diferentes, incluyendo generación de puentes, aglomeración, compactación y licuefacción. A una fase determinada, los bultos de partículas son pocos o numerosos, de diferentes tamaños y de diferentes grados de dureza. El apelmazamiento es un fenómeno por el cual, a una menor humedad, el flujo libre del polvo se transforma primero en grumos, la siguiente etapa es en forma de un sólido aglomerado y en la última etapa en un material pegajoso, lo que resulta en pérdida de funcionalidad y calidad del producto. Sin embargo, el apelmazamiento también puede ocurrir como resultado de una recristalización, ya sea después de fusión de grasas o una humectación de la superficie; así como una atracción electrostática entre partículas (Peleg, 1983).

#### **2.4.1.2 Propiedades químicas de los polvos**

##### **I. Higroscopicidad de partículas**

La higroscopicidad es la tendencia de un material para absorber la humedad de la atmósfera y con un equilibrio dinámico con agua en la atmósfera. La medición consiste en la toma de una muestra de compuesto, con un peso preciso en un recipiente, el cual se coloca en diversas condiciones de humedad para el período de hasta 2 semanas (Barbosa Cánovas *et al*, 2005).

- Si hay ganancia de peso: Es deliquescente o higroscópico.
- Si hay pérdida de peso: Es eflorescente.

Importancia de la medición:

- Afecta a la estabilidad química del polvo.
- Afecta a la propiedad de flujo (los compuestos higroscópicos tienen una menor capacidad de flujo y provoca variación de peso).
- La humedad en un material cohesivo causa formación de puentes sólidos y puentes líquidos entre las partículas, lo que finalmente forma aglomeración.
- Compuestos higroscópicos son generalmente “pegajosos” lo que también afecta a la compactación.

## II. Humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio se define como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado. El material está en equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra cuando la presión de vapor de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor de agua del aire ambiente. Para cada especie o variedad de material, la tensión de vapor tiene un valor característico acorde con la temperatura y el contenido de humedad del material (Marques *et al*, 1991). Ésta humedad debe controlarse para evitar problemas en las operaciones unitarias y en la estabilidad del producto, especialmente cuando existen materiales higroscópicos que se descomponen con el agua. Existen dos métodos para determinar la humedad de equilibrio de un material alimenticio: el estático y el dinámico (Labuza, 1971).

El método estático es aplicado en la mayoría de los alimentos en polvo. La curva de la isoterma se crea utilizando una muestra de masa conocida almacenándose en una serie de cámaras de humedad controladas, utilizando sales saturadas estándares, hasta alcanzar el equilibrio. Las actividades de agua de suspensiones de sales saturadas se relacionan en función de la temperatura. Una vez establecida la curva isoterma para un producto alimenticio, el contenido de humedad de cualquier muestra puede ser utilizado para determinar  $a_w$  mediante el uso de la curva isoterma (Prior, 1979). Las ventajas de la utilización de sales saturadas para la obtención de contenidos de humedad de equilibrio son: la misma solución de una sal se puede usar con diferentes temperaturas, sin grandes variaciones en el valor de humedad relativa; son menos corrosivas que los ácidos y aunque el material pierda o gane humedad en cantidades relativamente grandes, las soluciones permanecen saturadas, siempre que se deje un depósito de sal en el fondo (Nava *et al*, 2010).

### Isoterma de adsorción

Una isoterma de adsorción de agua ilustra la cantidad de estado estable de agua retenida (capacidad de retención de agua) por los sólidos de alimentos como una función del porcentaje de humedad relativa (%HR),  $a_w$  o almacenamiento a temperatura constante (Bell y Labuza, 2000). La sorción de humedad por los alimentos depende de muchos factores, incluyendo composición química, el estado físico-químico de los ingredientes, y la estructura física. Esto incluye la estructura

de poros, y las reacciones de deterioro que incluyen el crecimiento microbiano y estados físicos y los bien derivados patrones con respecto a  $a_w$  (Bell y Labuza, 2000). De manera general, una isoterma es simplemente una curva que relaciona el contenido de humedad de equilibrio de un producto, con la humedad relativa del aire o actividad de agua del producto (Figura 10) (Badui *et al*, 2006).

Actividad de agua ( $a_w$ ): La actividad de agua ( $a_w$ ) se define como la relación que existe entre la presión parcial de vapor de agua de una sustancia y la presión de vapor de agua del agua pura a la misma temperatura; siendo por esta razón un número sin unidades y con un valor que varía entre 0 y 1. En el equilibrio, la actividad de agua es igual a la presión de vapor ejercida por la sustancia en el ambiente cerrado que la rodea, donde se da una equivalencia entre la humedad relativa del aire en ese ambiente cerrado y la actividad del agua en la sustancia ensayada (Ecuación 4) (Fennema, 2000).

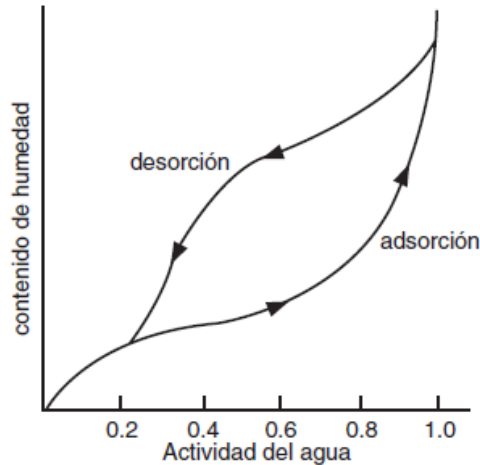
$$a_w = P / P_0 \quad (4)$$

\*Donde P es la presión de vapor de agua en la sustancia y  $P_0$  es la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

A medida que una solución se concentra, la presión de vapor disminuye y la  $a_w$  desciende a partir de un valor máximo de 1 para el agua pura (en ausencia de capilares o fuerzas de adsorción). La  $a_w$  está relacionada con el punto de congelación y con el de ebullición, así como con la Humedad Relativa en Equilibrio (HRE) y la presión osmótica (Fennema, 2000). Para una misma humedad relativa, pueden generarse dos isotermas, denominadas isotermas de adsorción y de desorción, obtenidas en función de las condiciones experimentales iniciales. Esto, porque el material puede presentar un contenido de humedad menor o mayor que la humedad de equilibrio para las condiciones del ambiente.

En la mayoría de los productos alimenticios, las isotermas tienen forma sigmoideal, pues la isoterma de desorción presenta valores de humedad de equilibrio superiores al de la isoterma de adsorción (Badui *et al*, 2006). En las isotermas se sorción se pueden distinguir 3 zonas: A, B y C, que corresponden a los diferentes tipos de interacciones entre las moléculas de agua y los demás componentes. Los límites entre ellas dependen de la naturaleza del alimento (Tabla 6) (Timmermann *et al*, 2001).





**Figura 10.** Curvas típicas de las isotermas de sorción de los alimentos. (Badui, *et al*, 2006)

**Tabla 6.** Zonas de las isotermas de sorción.

Zona	Descripción
Zona A	Es el agua más fuertemente ligada y menos móvil, esta retenida físicamente en microcapilares de diámetro inferior a $1 \mu m$ . Es muy difícil extraer, y no se encuentra disponible para actuar como disolvente. Constituye una cantidad muy pequeña del agua total de un alimento y corresponde una $a_w$ de 0.2-0.3 o inferior. El límite entre las zonas A y B es la denominada monocapa BET.
Zona B	Es el agua correspondiente a las capas de hidratación de los constituyentes solubles, es decir, proteínas, sales, azúcares, etc. La $a_w$ está comprendida entre 0.3 y 0.8 y corresponde a multicapas de agua. Un pequeño cambio en esta zona, el contenido acuoso puede presentar grandes variaciones en los valores de su actividad.
Zona C	Representa la mayor parte del agua de los tejidos y equivale a una $a_w$ de 0.80–0.99. Es el agua menos ligada y más móvil de los alimentos. Se encuentra retenida físicamente en membranas, capilares (diámetro superior a $1 \mu m$ ), geles, etc., por lo que se puede eliminar fácilmente. Su retención está determinada por el PH y las fuerzas iónicas. Es el responsable de la alteración de los alimentos ya que está disponible para el desarrollo de microorganismos y las reacciones químicas.

Fuente: (Timmermann *et al*, 2001)

Las isotermas experimentales pueden clasificarse en cinco tipos de acuerdo con S. Brunauer (Figura 11):

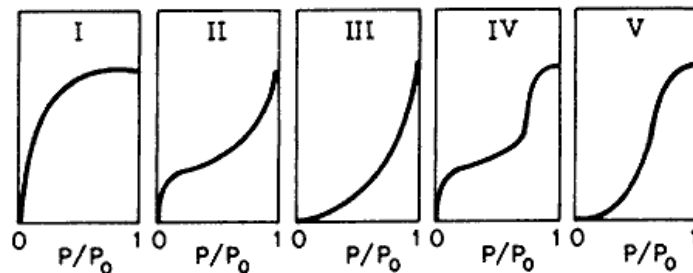
Tipo I: Se denomina isoterma de Langmuir y corresponde a la adsorción en la monocapa. La cantidad adsorbida aumenta con P hasta alcanzar un valor límite

correspondiente al recubrimiento total de la superficie por una monocapa. Es la isoterma característica de un proceso únicamente de fisisorción.

Tipo II: es indicativo de una adsorción física en multicapa. El rápido ascenso inicial corresponde a la formación de la primera capa, que tiene en este caso una constante de formación mayor que para el resto de capas (la entalpía de formación de la primera capa es más negativa que para el resto de capas). Al seguir aumentando la presión se forma la segunda capa de moléculas adsorbidas, seguida de otras más.

Tipo III: corresponde también a una adsorción física en multicapas, pero donde la constante de equilibrio de formación de la primera capa es igual que para las siguientes (no se observa diferencia entre el llenado de la primera capa y del resto).

Tipos IV y V: corresponde a adsorción en multicapas sobre materiales porosos. Difieren del Tipo II y III por la presencia de una rama horizontal (saturación). (Brunauer y Teller, 1938)



**Figura 11.** Diferentes tipos de isothermas de adsorción según S. Brunauer.

Una isoterma de sorción es aplicada en la tecnología de alimentos para (Marques *et al*, 1991):

- Formulación de mezclas de alimentos evitando la migración de humedad entre los ingredientes.
- Predecir la estabilidad química y física de los alimentos en función del contenido de humedad.
- Observar la influencia de la humedad del ambiente sobre el contenido de agua de un alimento envasado.
- Estimar el tiempo máximo de almacenamiento de un producto en un envase.
- Determinar la temperatura óptima de almacenamiento de productos

### III. Transiciones térmicas de fase en polvos

Una transición de fase es un cambio en el estado físico de un material, sus componentes son los que tienen un efecto significativo en sus propiedades físicas (viscosidad, calor específico, propiedades texturales, etc. Las transiciones de fase se clasifican como transiciones de primer orden, segundo orden y orden superior.

### **Transiciones de primer orden**

Las transiciones de fase de primer orden gobiernan los cambios del estado físico entre sólido, líquido y estados gaseosos. A una temperatura de transición de primer orden, por ejemplo, la fusión, cristalización, condensación, y la temperatura de evaporación, el cambio del estado físico a presión atmosférica se produce de forma isotérmica, y se libera o se requiere una cantidad dada de calor como calor latente para la transición.

#### **Cristalización**

En algún momento, las moléculas pueden obtener suficiente libertad de movimiento para organizarse espontáneamente en una forma cristalina. Esto se conoce como la temperatura de cristalización ( $T_c$ ). Esta transición de sólido amorfo a sólido cristalino es un proceso exotérmico, y da como resultado un pico en la señal de DSC (Bhadeshia, 2002).

#### **Punto de fusión**

A medida que la temperatura aumenta, la muestra alcanza su temperatura de fusión ( $T_m$ ). El proceso de fusión se traduce en un pico endotérmico en la curva de DSC. Los factores que determinan la temperatura de fusión de un material cristalino o parcialmente cristalino son dos: 1) las fuerzas intermoleculares, que son las responsables de la agregación molecular y pueden expresarse como la energía cohesiva o la energía necesaria para separar una molécula del agregado sólido o líquido y 2) la rigidez o flexibilidad de cadena. La capacidad para determinar las temperaturas de transición y entalpías hace al DSC una herramienta valiosa en la producción de diagramas de fases para varios sistemas químicos (Bhadeshia, 2002).

### **Transiciones de segundo orden**

Las transiciones vítreas o  $T_g$  pueden ocurrir a medida que aumenta la temperatura de un sólido amorfo. Estas transiciones aparecen como un paso en la línea de base de la curva obtenida por calorimetría (DSC). Esto es debido a que la muestra experimenta un cambio en la capacidad calorífica y al aumentar la temperatura, un sólido amorfo será menos viscoso.

Las transiciones termodinámicamente bien definidas de segundo orden no son típicas de los sólidos de los alimentos. Sin embargo, todos los sólidos amorfos no cristalinos muestran una transición vítrea cuando se transforman de un material vítreo sólido a un estado líquido (amorfo a viscoso). La transición vítrea es un cambio dentro de un sistema de no equilibrio lo que la hace complicada y relacionada con una serie de fenómenos dependientes del tiempo (Sperling, 1992; Roos, 1995). Todos los materiales amorfos aleatorios, se asemejan a líquidos por encima de su temperatura de transición vítrea. Las moléculas en sistemas amorfos aparecen por encima de la transición vítrea (Sperling, 1992).

## Transiciones de fase de proteínas

### Desnaturalización de proteínas

La desnaturalización de proteínas es un proceso en el que la disposición espacial de las cadenas polipeptídicas dentro de la molécula se cambian de la típica proteína nativa a un arreglo más desordenado y desplegada (Kauzmann, 1959). Entre algunos ejemplos se encuentra la desnaturalización de la  $\beta$ -lactoglobulina a una temperatura de 80.3 ° C, que depende de un contenido de agua inferior a 0.7 g agua/ g sólido seco (Rüegg *et al*,1975). El calor de desnaturalización ( $H_d$ ) es constante a alto contenido de agua a 14.4 J/ g. El agua afecta la temperatura de desnaturalización y donde el 50% de la proteína es desnaturalizada (Foegeding,1988). La desnaturalización de las proteínas de huevo blanco utilizando calorimetría diferencial de barrido presentan dos endotermas a las siguientes temperaturas: lisozima a 72°C y ovoalbúmina a 84°C. La ovoalbúmina se convirtió en S-ovoalbúmina, lo que desarrollo una endoterma de desnaturalización a 92.5° C (Dónovan *et al*, 1975 y Donovan y Mapes 1976). Por otra parte, los azúcares como la sacarosa estabilizan las proteínas de clara de huevo contra la desnaturalización y aumentan las temperaturas de desnaturalización a altas concentraciones de sacarosa (Chang *et al*,1988).

## Transiciones de fase de azúcares

Gran parte de los sistemas alimenticios con azúcares existe en estado amorfo por debajo de la temperatura de fusión del sólido, que significa un estado de no equilibrio del sólido, y que con el tiempo se transforma en un sólido cristalino estable. Un material amorfo, al aumentar la temperatura o variar su composición con agua u otros componentes, aumenta su movilidad molecular. La determinación de la Tg para conocer la estabilidad del producto es útil en sistemas con predominio de componentes azucarados (Peleg, 1993). El cambio del estado vítreo es un indicador del comienzo de los mecanismos de deterioro (Celeghin *et al*, 2002). Las proporciones entre almidón/agua o azúcar/agua tienen gran influencia en las características de temperatura y los múltiples picos del termograma (Biliaderis *et al*,1980). Las transiciones vítreas y de fusión toman lugar cuando los sistemas de almidón acuoso son calentados y el agua influencia la temperatura de estos eventos (Farkas y Mohácsi,1996).

## Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

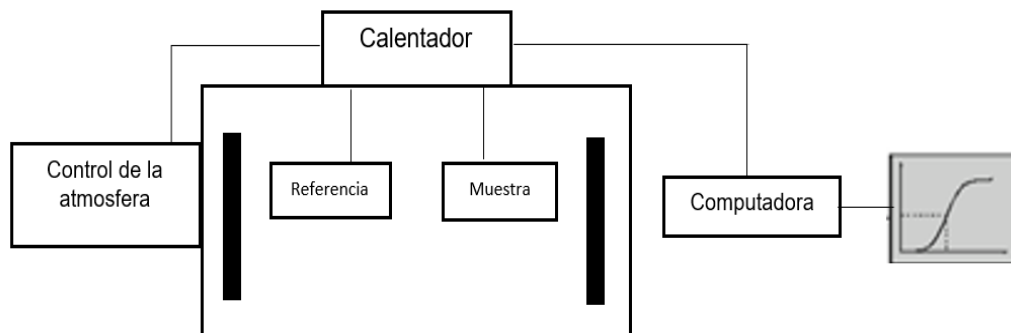
La aplicabilidad universal de las técnicas de análisis térmico ha llevado a su uso en casi todos los campos de la ciencia, con un fuerte énfasis en la solución de los problemas en tecnología e ingeniería de materiales, así como investigaciones científicas "puras". (Bhadeshia, 2002). Un análisis térmico mide el cambio en las propiedades físicas de una sustancia o material el cual es sometido a un programa de temperatura controlada como una función de la temperatura. La técnica de DSC permite determinar la variación en el flujo de calor dado por una muestra cuando se somete a temperaturas escaneadas en una atmósfera controlada. (Bhadeshia, 2002). En el calentamiento o enfriamiento cualquier transformación que está sucediendo en un material, está acompañado por un intercambio de calor; la técnica

de DSC permite que la temperatura de esta transformación sea determinada y el calor de este material sea cuantificado.

### **Funcionamiento del equipo DSC**

Existen dos tipos de programación para el funcionamiento del equipo de DSC: convencional estándar y modo modulado, que sirven para adaptar el sistema a la temperatura e intervalo de sensibilidad que se requiera. El equipo genera gráficos denominados termogramas, donde se muestra la diferencia en el flujo de calor entre una muestra y una referencia, como una función de la temperatura o tiempo, mientras la muestra está sometida a un programa de temperatura controlada (Figura 12).

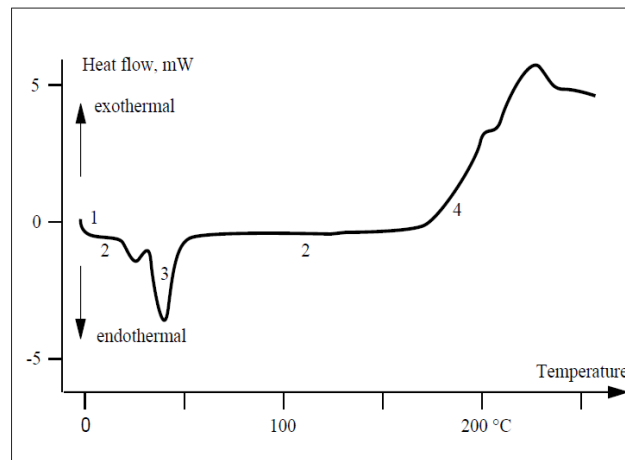
Las temperaturas son medidas en pequeñas celdas en contacto con dichas temperaturas, de esta forma la medición de la diferencia de flujo de calor en el crisol está dada como una señal proporcional a la diferencia en capacidades de calor entre la muestra y la referencia. (Bhadeshia, 2002). Es importante tener un buen contacto entre el soporte (sensor) y la muestra (fondo de la celda) para obtener una buena resolución y nitidez en los picos de DSC (Figura 12). El tamaño de la muestra y el de la referencia deben ser similares, y se debe considerar que las muestras pequeñas incrementan la resolución, mientras que una muestra grande tiene efecto en la sensibilidad de las transiciones de fase.



**Figura 12.** Funcionamiento del DSC.

Aplicaciones del Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) en diferentes alimentos (Heldman,2006):

- Aceites y grasas: Temperatura inicial de fusión, cristalización y comportamiento polimórfico.
- Harinas y almidones: Retrogradación, gelatinización y Transición vítrea (Tg).
- Polvos vegetales: Transición vítrea.
- Proteínas: Desnaturalización y agregación.
- Azúcares: Temperatura de cristalización, Fusión y Transición vítrea (Tg).



**Figura 13.** Termograma de DSC con sus transiciones de fase (Heldman,2006).

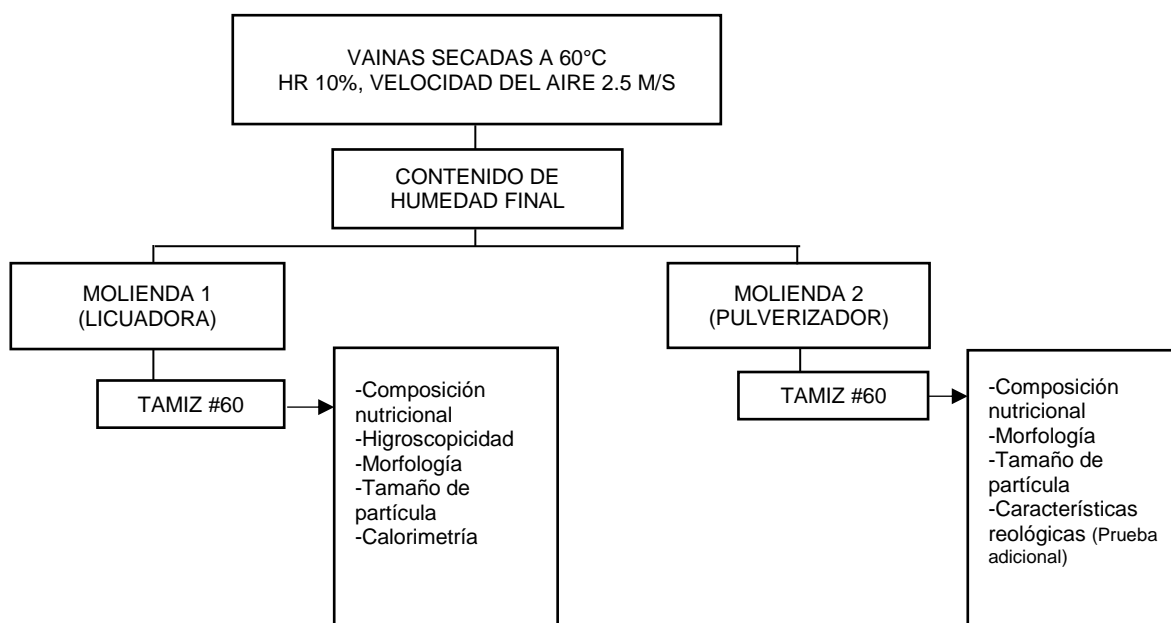
Un termograma de DSC se muestra como flujo de calor frente a la temperatura o frente al tiempo. Esta curva se puede utilizar para calcular entalpías de las transiciones (Figura 13). En la curva existen dos convenciones diferentes:

- Reacciones exotérmicas de la muestra: se presentan con un pico positivo, el cual se denomina puntos de cristalización (4).
- Reacciones endotérmicas de la muestra: se presentan con un pico negativo, el cual se denomina punto de fusión. (3).

## Capítulo 3. Materiales y métodos

### 3.1. Diseño experimental

Este trabajo de investigación se llevó a cabo mediante varias etapas, las cuales se resumen en la Figura 14. Los datos obtenidos a partir de las diferentes variables (características fisicoquímicas) se analizaron como campos de información fenomenológicos, a excepción de la variable de composición nutricional. Se utilizó como único factor el tipo de molienda (Tabla 7).



**Figura 14.** Etapas de caracterización de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*).

**Tabla 7.** Diseño de experimentos.

VARIABLES	VAINAS DE MEZQUITE 60°C	
	FACTOR	
	MOLIENDA 1, tamiz #60	MOLIENDA 2, tamiz #60
Composición nutricional	T student (muestras relacionadas)	T student (muestras relacionadas)
Higroscopicidad	*	
Morfología	*	*
Tamaño de partícula	*	*
Calorimetría	*	

\*Información generada

### 3.2. Obtención de harina de mezquite (*Prosopis laevigata*)

Se recolectaron vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) provenientes de Oaxaca; con grado de madurez III de color crema, las cuales se tomaron directamente del árbol y a punto de caer (Cerón *et al*, 2015). Para la selección de vainas se eliminaron las vainas con agujeros y/o partículas extrañas. Posteriormente se llevó a cabo una limpieza de las vainas mediante un lavado en agua y jabón, se realizaron cortes de 4 cm de las vainas seleccionadas y se tomó el peso hasta completar 500 g por cada lote.

Cada lote de vainas de mezquite se colocó en charolas, en una posición horizontal, para su tratamiento de secado por convección de aire, en un secador de bandejas de aire caliente, a temperaturas de 40,50,60 y 70 °C, con una humedad relativa (%HR) de 10% y velocidad de aire de 2.6 m/s. Posteriormente las vainas se almacenaron en bolsas herméticas en un desecador durante 24 horas. Se realizaron dos tipos de trituraciones (moliendas) de las vainas enteras de mezquite: molienda en una licuadora Xpert marca Oster, modelo BLSTVBPMC-051, motor de 2HP, durante 20 segundos; molienda en un molino pulverizador de cuchillas para leguminosas, modelo HC-2000Y, durante intervalos de 5 segundos hasta completar 20 segundos.

Las vainas de mezquite con los diferentes tratamientos de secado fueron trituradas con el proceso de molienda en licuadora, solo con el fin de seleccionar la molienda con el secado idóneo para su utilización en el trabajo experimental. Con el proceso de molienda en pulverizador se trituraron vainas de mezquite solo con el tratamiento de secado seleccionado de 60°C.

Se tomaron los pesos de las moliendas de vaina de mezquite en una balanza analítica marca Sartorius, modelo BP211D con precisión de 0.01 g. Posteriormente se realizaron tamizajes manuales de los dos tipos de moliendas en tamices tipo industrial marca A.S.T.M del N° 60 (abertura de 0.250 mm), y N°80 (abertura de 0.177 mm). A los polvos que quedaron retenidos en las mallas, se les aplicó una segunda molienda y un segundo tamizaje para la recuperación las mismas. Cada harina obtenida se identificó y se almacenó en bolsas de polietileno de baja densidad, en un desecador de vacío marca Crisol durante todo el proceso experimental.

### 3.3. Rendimiento de harinas de mezquite

Para la obtención del rendimiento de harinas de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) se tomaron y registraron los pesos en una balanza analítica marca Dever A-160 con precisión de 0.0001 g, de las moliendas obtenidas (con los dos tipos de trituración), y de la harina retenida en las mallas N° 60 y N° 80 durante el tamizado. El valor del porcentaje retenido en cada malla se determinó por la Ecuación 5. Este procedimiento fue realizado por triplicado para los dos tipos de moliendas.

$$RMN = \frac{100 * PN}{PI} \quad (5)$$



Donde RMN es el porcentaje (%) de harina retenido en la malla n,  $PN$  (g) es el peso del producto retenido en la malla n y  $PI$  (g) es el peso de la muestra inicial.

El rendimiento de las harinas de mezquite se obtuvo por la Ecuación 6 (IRAM 15854, 2010):

$$\% \text{ Rendimiento (RHM)} = \frac{\text{Masa de muestra extraída (g)}}{\text{Masa de muestra total (g)}} \times 100 \quad (6)$$

### **3.4. Determinación química proximal de harinas de mezquite**

La composición nutricional de las harinas de vainas de mezquite secadas a 40, 50, 60 y 70°C con el proceso de molienda en licuadora y harinas de mezquite secadas a 60°C con la molienda en pulverizador, se obtuvieron mediante los siguientes métodos analíticos.

#### **3.4.1. Contenido de humedad**

El contenido de humedad se determinó por el método (AOAC 925.10, 2005) donde se pesó una cantidad de harina de mezquite de 3 g en cápsulas de aluminio para 3 réplicas. Las muestras se secaron en una estufa marca VWR Scientific modelo 1410 a una temperatura de 105°C por 24 horas, las muestras se pesaron hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, las capsulas se dejaron enfriar en un desecador y se tomaron sus pesos.

#### **3.4.2. Proteínas totales**

Para la determinación cuantitativa de proteínas de la harina de mezquite se llevó a cabo el método método Kjeldahl (AOAC 950.48, 2000), y se utilizó alrededor de 1 g de muestra homogeneizada para cada réplica en tubos de digestión para la Unidad de digestión Foss tecator y unidad de destilación Kjeltex Foss Tecator 2006. Se obtuvieron gastos de HCl mediante titulación para determinar la cantidad de proteína cruda total (nitrógeno total). Los valores obtenidos se multiplicaron por un factor de corrección de 6.25 (%) para las 3 réplicas.

#### **3.4.3. Azúcares reductores totales**

Para la cuantificación de azúcares reductores y directos de harinas de mezquite se llevó a cabo el método volumétrico de Lane-Eynon (AOAC 923.09, 2000), donde se realizaron titulaciones de disoluciones A (50 ml) y B (50 ml) de sulfato de cobre y una neutralización con 10 ml hidróxido de sodio. Se agregó 1 ml de la disolución de azul de metileno y se completó la titulación hasta la decoloración del indicador. Los resultados fueron expresados en % de azúcares reductores directos. Este procedimiento fue realizado para 3 réplicas.

#### **3.4.4 Lípidos totales**

La obtención de grasas totales se llevó a cabo por medio del método Soxhlet (AOAC 969.24, 2000) durante 4 a 5 horas a una velocidad de condensación de 3

gotas/segundo. Se introdujeron 3 muestras de 2 gramos de harina de mezquite dentro de capacillos, elaborados con papel filtro. Los capacillos con la harina se colocaron dentro del sistema Soxhlet, y se adicionó éter de petróleo a los matraces. Una vez terminada la extracción de grasas, se eliminó el solvente de los tubos Soxhlet, hasta no detectar olor a éter. Los matraces la grasa extraída se secaron en un horno eléctrico marca VWR Scientific a 60°C durante 24 horas, posteriormente se almacenaron en un desecador y se tomaron los pesos correspondientes.

### **3.4.5. Determinación de fibra cruda**

La obtención de fibra cruda (AOAC 991.43,1994) se llevó a cabo con 3 muestras de harinas (capacillos de papel filtro con harina) que se ocuparon en el método de extracción de grasas, se filtraron a través de papel y los residuos se lavaron con agua destilada hasta la obtención de un ph de 7. Se transfirieron los residuos a una solución de NaOH al 1.25% a ebullición durante 30 minutos, y posteriormente se lavaron con agua destilada hasta un pH de 7. Los residuos se colocaron en crisoles de porcelana a peso constante y se secaron a 130°C en un horno eléctrico de secado y esterilización, durante 2 horas. Los crisoles se dejaron enfriar y se determinaron los pesos de los residuos.

### **3.4.6. Determinación de cenizas**

Los residuos de fibra cruda obtenidos, se calcinaron en crisoles de porcelana a 550°C durante 30 min en un horno de mufla marca Barlett modelo MF-2001, finalmente se dejaron enfriar las cenizas en un desecador y se determinaron los pesos de las cenizas (AOAC 923.03, 2000).

### **3.4.7. Prueba de Shapiro-Wilk y T-Student**

Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a los datos de composición nutricional de harinas de mezquite a 60°C por molienda en licuadora y molienda en molino pulverizador, para comprobar su normalidad (muestras<30). Las dos muestras de datos fueron comparadas mediante la prueba T-Student para muestras relacionadas, con la utilización de la herramienta estadística SPSS Statistics 2018 versión 24.0, con el fin de determinar una diferencia significativa. Para ambas pruebas estadísticas se utilizó un nivel de confianza del 95%, un alfa ( $\alpha$ ) de 0.05, y los siguientes criterios de decisión para su análisis:

- Prueba Shapiro-Wilk:  
H<sub>0</sub> (Hipótesis nula) = los datos provienen de una distribución normal.  
H<sub>1</sub> (Hipótesis alterna) = los datos no provienen de una distribución normal.

Si la probabilidad obtenida  $p \geq \alpha$ , se acepta H<sub>0</sub>; si es  $p \leq \alpha$ , se acepta H<sub>1</sub>.

- Prueba T-Student:  
H<sub>0</sub> (Hipótesis nula) = no hay diferencia significativa en los datos.  
H<sub>1</sub> (Hipótesis alterna) = si hay diferencia significativa en los datos.

Si la probabilidad obtenida  $p \leq \alpha$ , se rechaza la  $H_0$ , y se acepta  $H_1$ ; si es  $p > \alpha$ , no se rechaza  $H_0$ .

### 3.5 Determinación de isotermas de sorción

#### 3.5.1. Método estático gravimétrico

Las humedades de equilibrio de las harinas de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) se determinaron mediante el método estático gravimétrico a diferentes actividades de agua y temperaturas de 30, 35, 40 y 45 °C (Wolf *et al*, 1985). Todas las determinaciones se realizaron utilizando 3 g de muestra fresca de harina de mezquite secada a 60°C, con el proceso de molienda en licuadora y tamizaje en malla #60. Se ocupó un rango de actividad de agua de 0.07 a 0.97 utilizando diferentes disoluciones salinas saturadas (Bell y Labuza, 2000).

Las actividades de agua de las diferentes sales fueron determinadas mediante la utilización de ecuaciones matemáticas (Fontana, Schmidt, y Labuza, 2008; Roos, 1995; Greenspan, 1977) (Tabla 8). Para la determinación de Isotermas de adsorción se prepararon disoluciones de sales saturadas de NaCl,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , KOH, KCl, KI,  $K_2SO_6$ ,  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  que se introdujeron en desecadores de vacío de vidrio para mantener una humedad relativa constante en el espacio cerrado. Posteriormente, se pesaron 3 g de muestra de harina de mezquite, en una balanza analítica Denver A-160 con precisión de 0.0001 g; las muestras de harinas se colocaron en virutas de plástico secadas a peso constante (AOAC 925.10, 2005), y se introdujeron en cada desecador de vidrio herméticamente cerrado con sílica gel.

Para actividades de agua superiores a 0.65 se introdujo en cada desecador de vidrio, una tapa con 1 g de benzoato de sodio para evitar el crecimiento microbiano y enmohecimiento sin afectar el proceso de sorción (Galvéz *et al*, 2006). Los desecadores de vacío de vidrio herméticamente cerrados fueron colocados dentro de una estufa incubadora modelo-417 a las temperaturas requeridas y controladas. Las muestras de harinas fueron pesadas periódicamente, cada 2 días, hasta llegar al equilibrio. El punto de equilibrio entre la muestra y el ambiente del desecador se determinó cuando la diferencia en peso entre tres medidas consecutivas no excedió o fueron menores al 0.001% (Iglesias y Chirife, 1982). El tiempo requerido para lograr el equilibrio fue de aproximadamente 30 días.

Al alcanzar el equilibrio, se determinó el contenido en humedad de las muestras de harinas de mezquite, conociendo la humedad inicial de las harinas, así como los pesos inicial y final tomados en el proceso de sorción. Se utilizó la Ecuación 7 para determinar el contenido de humedad en equilibrio ( $X_{eq}$ ).

$$X_{eq} (b.s) = \frac{P_o * X_o + (P_f - P_o)}{P_o * (1 - X_o)} \quad (7)$$

Donde  $X_{eq}$  es la humedad de equilibrio en base seca (g de agua / g de sólido seco) de harinas de mezquite  $X_o$  es la humedad inicial en base seca (g de agua / g de

sólido seco),  $P_o$  es el peso inicial de las harinas de mezquite (g) y  $P_f$  es el peso final de las harinas de mezquite en (g).

**Tabla 8.** Actividad de agua de sales usadas en las isotermas de sorción.

SALES (Nombre y formula)	Ecuación	$a_w$			
		30°C	35 °C	40 °C	45°C
Hidróxido de Potasio <i>KOH</i>	$\ln a_w = (2094.489 * 1/T) - 9.49$	0.0754	0.0674	0.0604	0.0544
Cloruro de Magnesio <i>MgCl<sub>2</sub> (6H<sub>2</sub>O)</i>	$\ln a_w = (303.35 * 1/T) - 2.13$	0.3234	0.3182	0.3132	0.3084
Nitrato de Magnesio <i>Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> * 6H<sub>2</sub>O</i>	$\ln a_w = (356.6 * 1/T) - 1.82$	0.5257	0.5157	0.5063	0.4972
Yoduro de potasio <i>KI</i>	$\ln a_w = (255.9 * 1/T) - 1.23$	0.6801	0.6709	0.6620	0.6535
Cloruro de sodio <i>NaCl</i>	$\ln a_w = (228.92 * 1/T) - 1.04$	0.7524	0.7432	0.7345	0.7260
Cloruro de potasio <i>KCl</i>	$\ln a_w = (367.58 * 1/T) - 1.39$	0.8379	0.8216	0.8060	0.7912
Sulfato de potasio <i>K<sub>2</sub>SO<sub>6</sub></i>	$\ln a_w = (55.51 * 1/T) - .214$	0.9697	0.9668	0.9640	0.9613

### 3.5.2. Modelado de las isotermas de adsorción

Los datos experimentales obtenidos por el método estático de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) se modelaron por medio de las ecuaciones de BET (Brunauer, Emmett y Teller) y GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer). Se utilizaron dos tipos de software: Microsoft office MS Excel Solver 2010 y NCSS11 Data Analysis 2016 (USA), para la resolución de los modelos y obtención de parámetros.

#### 3.5.2.1. Modelo BET

Los datos experimentales obtenidos a partir de las isotermas de adsorción de 30, 35, 40 y 45°C de harinas de mezquite se ajustaron a la ecuación lineal BET (Ecuación 8) para  $a_w < 0,5$ , esto debido a que a partir de esos niveles de  $a_w$ , los fenómenos que describen las interacciones del agua en el alimento no son de sorción, sino más del tipo soluto-disolvente y el agua empieza a estar presente en el sistema movilizandolos solutos en forma de fase líquida (Bell y Labuza, 2000). Los parámetros  $X_m$  y  $C$  de este modelo fueron obtenidos mediante una regresión no lineal a los datos experimentales con la utilización de MS Excel Solver (Microsoft, Redmond, WA, USA).

$$\frac{1}{X_w} * \frac{a_w}{1 - a_w} = \frac{1}{X_{w,a} * C} + \frac{C - 1}{X_{w,a} * C} * a_w \quad (8)$$

Donde  $X_w$  es el contenido de humedad en el equilibrio (g agua/g sólido seco),  $a_w$  es la actividad de agua,  $C$  es la constante de B.E.T. de calor de sorción y  $X_{w,a}$  es el contenido de humedad de la monocapa.

### 3.5.2.2. Modelo GAB

Los datos experimentales obtenidos a partir de las isotermas de adsorción de 30, 35, 40 y 45°C de harina de mezquite se ajustaron a la ecuación del modelo GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer) en un intervalo de  $a_w$  de 0,1 a 0,9 (Wolf *et al*, 1985) (Ecuación 9). Mediante la solución de la Ecuación 9 del modelo GAB en el software NCSS11 Data Analysis 2016, se obtuvieron los parámetros  $X_m$  (humedad del producto correspondiente a los puntos de adsorción primarios saturados por moléculas de agua),  $C$  (constante de Guggenheim relacionada con el calor de adsorción de la monocapa) y  $k$  (factor de corrección relacionado con el calor de sorción de la multicapa). Para saber la fiabilidad de los datos del modelo, se utilizó el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) y el error estándar (s). (Hassini *et al*, 2015).

$$X_{eq} = \frac{X_m * C * k * a_w}{(1 - k * a_w) * (1 - k * a_w + C * k * a_w)} \quad (9)$$

Donde  $X_{eq}$  es el contenido de humedad en equilibrio (g agua /g sólido seco),  $X_m$  es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/g sólido seco),  $C$  es una constante relacionada al calor de sorción de la monocapa,  $k$  es una constante relacionada al calor de sorción de la multicapa y  $a_w$  es la actividad de agua.

### 3.5.2.3. Caracteres termodinámicos de sorción

Se obtuvieron las constantes tipo Arrhenius  $C_{g0}$  y  $K_0$  de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) mediante la resolución de las Ecuaciones 10 y 11, para expresar la dependencia de la temperatura de sorción, mediante su incorporación en los parámetros  $C$  y  $K$  del modelo GAB descrito con anterioridad; posteriormente se obtuvieron las diferencias en entalpías, entre la monocapa y multicapa  $\Delta H_{Cg}$ , entre el volumen mayor de líquido y multicapa  $\Delta H_K$ , y la constante de dependencia de temperatura de la monocapa  $\Delta H_x$  mediante la aplicación de las ecuaciones 12, 13 y 14. Cada ecuación se introdujo en el software NCSS11 Data Analysis 2016, USA para el cálculo de cada carácter termodinámico. Para saber la fiabilidad de los datos se utilizó el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) y el error estándar (s) (Quirijns *et al*, 2005).

$$C = \frac{q_1}{q_m} = C_{g0} * \exp\left(\frac{\Delta H_{Cg}}{R * T}\right) \quad (10)$$

Donde  $C$  es el parámetro del modelo GAB,  $q_1$  es la función de partición de la molécula en monocapa,  $q_m$  es la función de partición de la molécula en multicapa,  $C_{g0}$  es la constante tipo Arrhenius para expresar la dependencia de la temperatura

de C,  $\Delta H_{cg}$  es la diferencia de entalpía entre monocapa y la multicapa ( $\text{J/mol}^{-1}$ ), R es la constante de los gases y T es la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$$K = \frac{q_l}{q_m} = K_0 * \exp\left(\frac{\Delta H_K}{R*T}\right) \quad (11)$$

Donde K es el parámetro del modelo GAB,  $q_l$  es la función de partición de la molécula en el volumen mayor de líquido,  $q_m$  es la función de partición de la molécula en multicapa,  $K_0$  es la constante tipo Arrhenius para expresar dependencia de la temperatura de K,  $\Delta H_K$  es la diferencia de entalpía entre el volumen mayor de líquido y la multicapa ( $\text{J/mol}^{-1}$ ), R es la constante de los gases y T es la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$$\Delta H_{cg} = H_1 - H_m \quad (12)$$

Donde  $H_1$  es la entalpía molar de sorción de moléculas adsorbidas en la primera capa ( $\text{J/mol}^{-1}$ ) y  $H_m$  es la entalpía molar de sorción de las moléculas adsorbidas en la multicapa ( $\text{J/mol}^{-1}$ ).

$$\Delta H_K = H_l - H_m \quad (13)$$

Donde  $H_l$  es la entalpía para la condensación del volumen mayor de líquido ( $\text{J/mol}^{-1}$ ) y  $H_m$  es la entalpía molar de sorción de las moléculas adsorbidas en la multicapa ( $\text{J/mol}^{-1}$ ).

$$X_m = X_{m0} * \exp\left(\frac{\Delta H_X}{R*T}\right) \quad (14)$$

Donde  $X_m$  es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/g sólido seco),  $X_{m0}$  y  $\Delta H_X$  son las constantes para expresar la temperatura de dependencia de  $X_m$ , R es la constante de los gases y T es la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ).

### 3.6. Determinación de calor isostérico de sorción

El calor isostérico de sorción ( $Q_{st}$ ) fue determinado usando la ecuación derivada de Clausius Clapeyron para calcular el cambio de entalpía asociado al proceso de sorción (Ecuación 15).

$$\left[\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)}\right]_{CHE} = -\frac{Q_{st}-\lambda}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (15)$$

Donde  $q_{st}$  es el calor isotérico neto de sorción ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ), R es la constante universal de los gases ( $0.00831 \text{ Joules} / ^{\circ}\text{K} \cdot \text{mol}$ ),  $a_w$  es la actividad de agua, T es la temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ) y  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua pura a temperatura ambiente ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ).

El calor isostérico neto de sorción ( $q_{st}$ ) se obtuvo mediante el cálculo de la Ecuación 16. Se graficó  $\ln a_w$  contra  $1/T$  para diferentes contenidos de humedad específicos del material (entre 0.05 y 0.25 g de agua/g sólido seco) en el programa office Excel 2010. Con el grafico de líneas rectas, se determinaron las pendientes que son igual a  $q_{st} = R$  (Tsami,1991; Kiranoudis *et al*, 1993). Para la obtención de líneas rectas se calcularon los valores de  $a_w$  a diferentes temperaturas y contenidos de humedad en equilibrio, aplicando los parámetros GAB en la forma de la ecuación GAB transformada  $a_w=f(X_{eq})$  (Ecuación 17) mediante la utilización del programa Mathcad versión 14.0.0.163.

$$q_{st} = -R \frac{\partial \ln a_w}{\partial (1/T)} \quad (16)$$

$$a_w = \frac{\left[ 2 + \left( \frac{X_m}{X_{eq}} - 1 \right) * C - \left\{ \left( 2 + \left( \frac{X_m}{X_{eq}} - 1 \right) * C \right)^2 - 4 * (1 - C) \right\}^{\frac{1}{2}} \right]}{[2 * K * (1 - C)]} \quad (17)$$

Donde  $a_w$  es la actividad de agua,  $X_m$  es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/g sólido seco),  $X_{eq}$  es el contenido de humedad en equilibrio (g agua/g sólido seco),  $C$  es la constante de Guggenheim de la ecuación de GAB y  $K$  es la constante de GAB del factor de corrección de las propiedades de la multicapa.

Los valores de calor isostérico de sorción ( $Q_{st}$ ) se obtuvieron mediante su despeje en la Ecuación 18 y se elaboró el grafico de  $Q_{st}$  vs  $X_{eq}$  en el programa office Excel 2010. Posteriormente dichos datos de  $Q_{st}$  se ajustaron al modelo Tsami mediante la aplicación de la Ecuación 19 con dos términos (Tsami,1990) en el programa Matlab versión 9.3 para la predicción de parámetros de ajuste a, b, c y d. Para saber la fiabilidad de los datos de ajuste, se utilizó el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) (Hassini *et al*, 2015).

$$q_{st} = Q_{st} - \Delta H_{vap} \quad (18)$$

Donde  $Q_{st}$  es el calor isostérico de sorción ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ),  $q_{st}$  es el calor isostérico neto ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ) y  $\Delta H_{vap}$  es la entalpia de vaporización del agua pura ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ).

$$Q_{st} = a \exp(b * X_{eq}) + c \exp(d * X_{eq}) \quad (19)$$

Donde  $Q_{st}$  es el calor isostérico de sorción ( $\text{kJ/mol}^{-1}$ ), parámetro a = 101.8, parámetro b= -3.681, parámetro c= 0.003337, parámetro d= 30.84 y  $X_{eq}$  es el contenido de humedad en equilibrio de la harina de mezquite (g agua/g sólido seco).

## **3.7. Determinación de propiedades físicas fundamentales**

### **3.7.1. Morfología de partículas**

Para la determinación de las propiedades de forma y estructura de partículas de harinas de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) provenientes de Oaxaca (Tabla 2), se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca JEOL, modelo JIB-4601F, con una resolución espacial de 1.2 nm, haz iónico focalizado y cámara digital (CIIDIR-Oaxaca). Se introdujeron 6 muestras de harinas en total, siendo 3 muestras pertenecientes a la molienda en licuadora y 3 muestras con molienda en molino pulverizador, con tratamiento de secado a 60°C y tamizadas en malla #60. Cada muestra se colocó en pequeña cantidad (lo que tocó el pincel), arriba de placas de grafito, las cuales estaban puestas sobre cilindros de cobre previamente identificados, se eliminaron los excesos de muestra de harina y posteriormente se metieron a una caja Petri con sílica, para evitar que la muestra adsorbiera la humedad del medio, hasta su introducción en el microscopio. Una vez terminada la preparación de las muestras, estas se colocaron en una platina y se introdujeron a la cámara de vacío del MEB. Una vez colocadas las muestras y alcanzada la presión de vacío, el equipo fue operado mediante la utilización de dos tipos de detectores: Detector de electrones secundarios tipo E-T (Everhart-Thornley) para la obtención de imágenes sobre la morfología de los polvos (harinas), y Detector de electrones retrodispersados de estado sólido multielementos, para la obtención de imágenes sobre componentes químicos por la dispersión de su energía. Se ocupó un rango de magnificación de 50x a 2500 x para los dos detectores en las 6 muestras.

### **3.7.2. Distribución de tamaño de partícula**

La distribución de tamaño de partícula de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) se obtuvo mediante el principio de medición de difracción de luz Láser azul (ISO 13320, 2009) y la utilización del equipo Microtrac Blueray M3551-1W-BU00 en medio húmedo, con rango de medición desde 10 nm hasta 2,000 micras. Se aplicó un ultrasonido por 30-60 segundos con una potencia de 30 watts a 800 gr de harina aproximadamente, del cual se dividió en tres muestras para facilitar la dispersión de las partículas y evitar que su tamaño se alterara, estas se suspendieron en alcohol isopropílico, logrando repetibilidad en los resultados.

### **3.7.3. Angulo de reposo y fluidez**

La determinación de ángulo de reposo estático se llevó a cabo mediante la técnica de pruebas de fluidez (ASTM C1444-00, 2000) por medio de la ecuación 20. Para las pruebas de fluidez se ocuparon dos tipos de muestras: (1) 100 g harina de mezquite con tratamiento de secado a 60°C, tamizadas en malla #60 y trituradas en licuadora (HML) y (2) 100 g de harina de mezquite con tratamiento de secado a 60°C, tamizadas en malla #60 y trituradas en molino pulverizador (HMP).



Las pruebas de fluidez consistieron en vaciar en cada muestra de harina en una superficie de papel a través de un embudo de dimensiones específicas desde una altura de 20 cm y con un diámetro interno de la salida del embudo de 0.4 cm. Luego de posicionar el embudo a la altura establecida, se tapó la salida inferior y se llenó el embudo con las muestras de harina. Posteriormente, se removió el tapón y se dejó caer la harina continuamente de manera de mantener un flujo constante de material hasta que el punto de descarga del embudo fuera liberado y formado el pico del montículo de harina formado. Se tomaron los tiempos (seg) de caída de la harina de mezquite para cada muestra. Se midieron los diámetros en la base del montículo para cada muestra, los cuales se promediaron, registrándose este valor como  $D_{a1}$  y  $D_{a2}$ . Este procedimiento se repitió por triplicado para las dos muestras, así como su cálculo del ángulo de reposo (Ecuación 20).

$$\Phi_{rep} = \tan^{-1} [ 2H / (D_a - d) ] \quad (20)$$

Donde H es la altura entre la superficie de papel y el punto de descarga del embudo (20 cm),  $D_a$  es el promedio de los tres diámetros tomados (cm) y d es el diámetro interno de la salida del embudo (0.4 cm).

### **3.8. Determinación de propiedades térmicas de harinas de mezquite**

#### **3.8.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) de harinas**

##### **3.8.1.1. Preparación de la muestra de harina**

Se utilizaron 4 muestras de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) de la molienda en licuadora, sometidas previamente a actividades de agua de 0.07, 0.32, 0.51 y 0.67, a 4 temperaturas (30,35,40 y 45°C) para su análisis térmico en un calorímetro de barrido diferencial (DSC) marca TA Instruments, modelo Q2000. En total se prepararon y analizaron 16 muestras de harina de mezquite. Para cada muestra de harina se tomó un peso de 17 mg en base seca en una báscula analítica marca Denver con precisión de 0.0001 mg. Las muestras se colocaron dentro de cápsulas herméticas y se sellaron con las tapas herméticas marca Tzero previamente pesadas, mediante una prensa marca Tzero. Las capsulas con muestra se almacenaron en un desecador al vacío marca Crisol para su posterior análisis en el equipo DSC.

##### **3.8.1.2. Preparación de muestras de almidones, proteínas de mezquite y azúcares simples**

Se realizaron extracciones de fracciones de almidón y proteína de harinas de mezquite de acuerdo al método utilizado para *Mucuna pruriens* (leguminosa) (Corzo *et al*, 2000). Para comprobar la existencia de almidones, se aplicó la prueba

cualitativa de Lugol, y para las fracciones de proteínas se utilizó la técnica reactiva de Biuret (Tietz, 2006).

Se utilizaron muestras de referencia de almidón hidratado en relaciones de 1:5 y 1:10 3 (harina de arroz: agua destilada). Para las muestras de almidón hidratado con relación 1:5 se tomó 3 mg en base seca y se utilizó agua destilada como medio hasta completar la solución requerida. Para las muestras de almidón hidratado con relación 1:10 se tomó 3 mg en base seca de almidón y agua destilada hasta completar una muestra en la cantidad de 17 mg. Para las muestras de almidón y proteína extraída de harina de mezquite, Albumina de Suero Bovino (BCA), almidón de maíz sin hidratar y azúcares simples como fructosa, glucosa y sacarosa, se pesaron una cantidad de 17 mg para cada muestra. Cada una de las muestras se colocaron inmediatamente dentro de cápsulas herméticas Tzero y se sellaron con las tapas herméticas mediante una prensa Tzero, para que la muestra no ganara ni perdiera humedad antes y durante la experimentación. Las muestras se dejaron reposar durante una hora para que los almidones se hidrataran y las demás muestras se asentaran.

### **3.8.1.3. Condiciones de operación del equipo de DSC para harinas de mezquite, proteínas de mezquite, almidones y azúcares**

Una vez encapsuladas las cuatro muestras de harinas de mezquite, sometidas previamente a actividades de agua de 0.07, 0.32, 0.51 y 0.67, se introdujeron en las celdas de un calorímetro de barrido diferencial (TA Instruments, Modelo Q2000). El equipo se calibró con una cápsula vacía sellada herméticamente como referencia. Posteriormente se inició el software del equipo de DSC Q2000 y se aplicaron las condiciones seleccionadas.

Las condiciones experimentales consistieron en correr las muestras en modo modulado (MDSC) a una velocidad de calentamiento de 2°C/min y una rampa de temperatura de 0.0°C a 250°C. Dichas condiciones se establecieron a partir de una revisión de diferentes alimentos que tuvieran parecido a la muestra de harina de mezquite en su composición química-nutricional. La velocidad de calentamiento usada fue con el fin de observar mejor los eventos térmicos de la harina de mezquite. Al terminar cada corrida experimental, se obtuvieron termogramas de flujo de calor contra temperatura con el software TA Instruments Universal Analysis (DSC).

Por otra parte, las muestras de almidón y proteína extraídas de harina de mezquite, Albumina de Suero Bovino (BCA) y almidón de maíz sin hidratar se corrieron a una velocidad de calentamiento de 10°C/min y una rampa de calentamiento de 10°C a 200°C. Las muestras de glucosa, fructosa y sacarosa se corrieron a una velocidad de calentamiento de 2°C/min y una rampa de calentamiento de 0°C a 220°C.

### 3.9. Características reológicas de masas de trigo-mezquite: prueba adicional

Las características reológicas de masas de trigo-mezquite fueron obtenidas mediante la utilización de un alveógrafo tipo NG Chopin según la Norma ISO 27971 (2008). Se realizaron cuatro mezclas de harina de trigo blando con harina de mezquite añadida en 5%, 10%, 15% y 20% con una solución de cloruro de sodio al 2.5% en condiciones controladas de temperatura (24°C) y humedad, durante un tiempo predeterminado. Posteriormente, se llevó a cabo la etapa de amasado en el alveógrafo Chopin. Una vez terminada esta etapa, las masas se laminaron y se extrajeron 5 porciones aplanadas y circulares de cada mezcla; tras un periodo de reposo a 24°C, los discos de masas se colocaron sobre una platina con un orificio de salida de aire. Luego de insuflar aire en la masa hasta formar una burbuja, se registraron gráficamente las variaciones de la presión del aire dentro de la burbuja, hasta que ésta hizo ruptura. Se obtuvo una curva promedio y sobre ésta última se calcularon los parámetros que indicaron la tenacidad (P), extensibilidad (L), índice de hinchamiento y elasticidad, así como la fuerza de panificación (W) necesario para insuflar la masa.

## Capítulo 4. Resultados y Discusión

### 4.1 Harinas de mezquite y rendimientos

Las vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) se recolectaron en la comunidad de Santiago Sulchiquitongo, en los meses de mayo-julio del año 2016 y 2017, durante su etapa de maduración 3 (vainas color crema). En las Figuras 15 y 16 se pueden observar los procesos de trituración para las vainas de mezquite y sus tamizajes. En las Figuras 17 y 18 se muestran las harinas obtenidas, las cuales presentaron una apariencia similar para los dos tipos de moliendas, con una ligera aglomeración de partículas. 4 niveles de temperatura se aplicaron a las vainas y para cada una se aplicaron procesos de molienda y tamizaje en malla #60 y #80.

**Tabla 9.** Rendimiento de harinas de mezquite obtenidas por molienda en licuadora.

Temperatura de secado	N° de tamiz	Peso de vainas molidas (g)	Polvo obtenido (tamizado) (g)	% RHM	Polvo retenido en malla	% RMN
40°C	60	298.60	224.24	75.09	65.76	22.02
	80	299.10	119.44	39.93	179.61	60.05
50°C	60	297.41	219.18	73.69	77.82	26.16
	80	298.35	118.95	39.86	179.20	60.06
60°C	60	296.92	221.14	74.47	74.86	25.21
	80	296.86	118.38	39.87	178.48	60.12
70°C	60	299.10	219.22	73.29	79.78	26.67
	80	299.05	119.23	39.86	179.79	60.12

%RMN: Porcentaje de harina retenida en la malla; %RHM: Porcentaje de rendimiento de harina de mezquite.

**Tabla 10.** Rendimiento de harinas de mezquite obtenidas por molienda en molino pulverizador.

Temperatura de secado	N° de tamiz	Peso de vainas molidas (g)	Polvo obtenido (tamizado) (g)	% RHM	$\bar{X}_{RHM}$ (%)	Polvo retenido en malla	% RMN	$\bar{X}_{RMN}$ (%)
60°C	60	240.82	151.50	62.91	62.98	89.30	37.08	36.99
		247.92	156.66	63.18		91.23	36.79	
		240.60	151.26	62.86		89.31	37.11	
	80	240.21	95.78	39.88	39.87	144.38	60.10	60.09
		240.30	95.80	39.86		144.42	60.09	
		240.12	95.74	39.87		144.32	60.10	

%RMN: Porcentaje de harina retenida en la malla;  $\bar{X}_{RMN}$ : Promedio de harina retenida en la malla.  
 %RHM: Porcentaje de rendimiento de harina;  $\bar{X}_{RHM}$ : Promedio de rendimiento de harina.

De acuerdo a los datos de rendimiento de harinas por molienda en licuadora (Tabla 9), se observó que el valor más alto (75.09 de %RHM) fue para la harina secada a 40° y tamizada en malla N°60, seguida de la harina secada a 60°C y tamizada en malla N°60 con un valor de 74.47%. El menor rendimiento se obtuvo para la harina secada a 70°C. También se observó que las muestras a 70°C presentaron un oscurecimiento más marcado.

Las vainas secadas a 40°C poseen un contenido de humedad de 0.16 g agua/g sólido seco, el cual es elevado para el proceso de molienda pues provoca aglutinamiento de la muestra; por lo cual fueron descartadas para su utilización. Con los datos obtenidos, se seleccionó la harina con un secado a 60°C y tamizado en malla N° 60, debido a que presentó un buen rendimiento y bajo % de retención en la malla, además que dicha harina cumplió con la normatividad para harinas entre Grado II y III (NOM 007, 1982) para su aplicación en productos de repostería que no requieran amasado o masas de alta consistencia y volumen, así como para la elaboración de pastas integrales (Tabla 10).

Por otra parte, las harinas obtenidas a partir de la molienda en licuadora y molino pulverizador, con un tamizado en malla N°80, fueron descartadas para su utilización debido a que presentaron un mayor % de RMN y menor % de RHM. El rendimiento de las harinas obtenidas con el molino pulverizador a 60°C y tamiz N°60 fue alto (62.98 de %RHM), y solo 36.9% de RMN, por lo que se seleccionó este procesamiento para su utilización.



**Figura 15.** Proceso de trituración en licuadora de vainas de mezquite secadas a 60°C y tamizadas en malla N° 60.



**Figura 16.** Proceso de trituración en molino pulverizador de vainas de mezquite secadas a 60°C y tamizadas en malla N° 60.



**Figura 17.** Harinas de mezquite obtenidas por un secado de vainas a 60°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.



**Figura 18.** Harinas de mezquite obtenidas de secado de vainas a 60°C, molienda en molino pulverizador y tamizaje en malla N° 60.

## 4.2. Composición nutricional de harinas de mezquite

Las composiciones nutricionales de harinas de mezquite se muestran en las siguientes tablas. En la Tabla 13 se observa un equilibrio en la cantidad de los componentes nutricionales de la harina por licuadora a comparación de las demás harinas, que, aunque presentan mayor cantidad de proteína, estas son bajas en carbohidratos, lípidos y fibra. La Tabla 15 presenta un leve aumento en la cantidad de la mayoría de sus componentes nutricionales, especialmente en carbohidratos, grasas y fibra, pero con una disminución en sus proteínas, a comparación de la Tabla 13. La harina por molino pulverizador reveló un cambio en su contenido energético, posiblemente por una concentración de azúcares; así como un mayor oscurecimiento y una leve aglomeración de las partículas. Un factor que pudo afectar estos cambios pudo ser el calor que generó el molino al momento de su trituración, el cual fue con mayor fuerza e intensidad.

El contenido de humedad de las harinas de mezquite y el contenido de proteína tanto de licuadora como de molino pulverizador cumplieron con las especificaciones de la NMX-007-1982 y el Codex alimentario argentino (FAO,2010) para considerarse una harina Grado II y III. La harina de mezquite puede ser utilizada para la elaboración de productos de repostería (Grado II), y para la elaboración de pastas para sopa o espagueti (Grado III). Es posible su utilización para la elaboración de masas para pan con la adición de harina de trigo para un aumento en la consistencia de la masa. No obstante, debido al alto contenido de fibra de la harina de mezquite, esta sobrepasa el requerimiento necesario para utilizarse como una harina de Grado I.

Las harinas obtenidas por los dos tipos de molienda presentaron un alto contenido nutricional en hidratos de carbono, proteínas y fibra, a comparación de los valores reportados para la misma especie de *Prosopis* por otros autores; debido a la trituración de la vaina entera, incluida la semilla (Barba de la Rosa *et al*, 2006; Felker *et al*, 2013). La harina de mezquite es idónea para su consumo por su aporte nutritivo y con un potencial de utilización como endulzante, productos como pastas, galletas, botanas, productos para empanizar, así como un suplemento alimenticio.

**Tabla 11.** Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 40°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.

Componentes	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (g/100 g)
Contenido energético (kcal/100 g)	101.56	97.23	98.78	99.19±2.19
Hidratos de Carbono (g)	7.06	6.55	8.49	7.36±1.00
Azúcares (g)	1.92	1.76	2.67	2.11±0.48
Proteínas (g)	12.87	14.12	13.96	13.65±0.68
Lípidos (g)	1.09	1.89	2.01	1.66±0.50
Fibra (g)	16.61	16.59	16.68	16.62±0.05
Cenizas (g)	3.04	3.02	3.06	3.04±0.02
Humedad (g. agua/g. sólido seco).	0.17	0.16	0.17	0.16±0.00

**Tabla 12.** Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 50°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.

Componentes	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (g/100 g)
Contenido energético (kcal/100 g)	136.58	135.79	136.67	136.34±0.48
Hidratos de Carbono (g)	15.66	14.98	15.76	15.46±0.42
Azúcares (g)	3.97	4.80	4.65	4.47±0.44
Proteínas (g)	13.01	13.53	13.29	13.27±0.26
Lípidos (g)	2.12	2.57	2.46	2.38±0.23
Fibra (g)	16.60	16.90	16.50	16.66±0.20
Cenizas (g)	2.99	3.04	3.01	3.01±0.02
Humedad (g. agua/g. sólido seco).	0.13	0.16	0.16	0.15±0.01

**Tabla 13.** Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 60°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.

Componentes	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (g/100 g)
Contenido energético (kcal/100 g)	171.00	171.03	170.88	170.97±0.07
Hidratos de Carbono (g)	24.37	24.27	24.19	24.27±0.09
Azúcares (g)	7.52	7.48	7.46	7.48±0.03
Proteínas (g)	12.49	12.32	12.39	12.40±0.08
Lípidos (g)	2.12	2.17	2.19	2.16±0.03
Fibra (g)	16.90	17.10	16.70	16.90±0.2
Cenizas (g)	3.12	3.14	3.11	3.12±0.01
Humedad (g. agua/g. sólido seco).	0.10	0.09	0.11	0.10±0.01

**Tabla 14.** Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 70°C, molienda en licuadora y tamizaje en malla N° 60.

Componentes	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (g/100 g)
Contenido energético (kcal/100 g)	301.95	303.02	302.59	302.52±0.53
Hidratos de Carbono (g)	58.78	57.77	58.92	58.49±0.62
Azúcares (g)	15.12	15.93	15.89	15.64±0.45
Proteínas (g)	10.58	10.73	10.69	10.66±0.07
Lípidos (g)	2.64	3.23	2.79	2.88±0.30
Fibra (g)	16.62	16.56	16.67	16.61±0.05
Cenizas (g)	2.96	2.97	3.01	2.98±0.02
Humedad (g. agua/g. sólido seco).	0.10	0.10	0.11	0.10±0.00

**Tabla 15.** Tabla nutrimental de harina de mezquite con un tratamiento de secado a 60°C, molienda en molino pulverizador y tamizaje en malla N° 60.

Componentes	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio (g/100 g)
<b>Contenido energético (kcal/100 g)</b>	198.15	199.10	198.90	198.72±0.50
<b>Hidratos de Carbono (g)</b>	26.12	26.27	26.14	26.18±0.08
<b>Azúcares (g)</b>	10.16	10.19	10.20	10.18±0.02
<b>Proteínas (g)</b>	11.68	11.90	11.73	11.77±0.12
<b>Lípidos (g)</b>	2.84	2.95	2.90	2.90±0.06
<b>Fibra (g)</b>	17.20	17.38	17.18	17.25±0.11
<b>Cenizas (g)</b>	3.40	3.50	3.46	3.45±0.05
<b>Humedad (g. agua/g. sólido seco).</b>	0.10	0.11	0.10	0.10±0.01

#### 4.2.1. Prueba T-Student de harinas de mezquite

De acuerdo a la prueba de Shapiro-Wilk los datos de composición nutricional de las dos muestras de harina con molienda en licuadora y molino pulverizador presentan una distribución normal, de acuerdo al criterio  $p > 0.05$  (Tabla 16).

Por otra parte, la prueba T-Student reveló que, si existe una diferencia significativa en torno a la significancia estadística, para los componentes nutricionales como hidratos de carbono, lípidos, fibra y cenizas entre ambas muestras de harinas de acuerdo a su tipo de molienda (licuadora y molino pulverizador), debido a que los valores de significación (sig.) o valor p, fueron menores a alfa ( $p < 0.05$ ). Se observó que las diferencias entre los datos para estos componentes están en el límite aceptable, dentro del intervalo de confianza del 95%. Por tanto, se rechazó la hipótesis nula de igualdad. No obstante, para el componente nutricional de proteína y el contenido de humedad de ambas harinas no presentaron una diferencia significativa (Tabla 17).

Para fines prácticos, las diferencias en cantidad sobre los componentes de ambas harinas son irrelevantes, por lo cual el tipo de molienda aplicado no representa un cambio en la composición nutricional de las harinas que pueda afectar su calidad y utilización en diferentes opciones para su consumo. Sin embargo, el incremento del contenido energético de la harina de mezquite por molino pulverizador podría clasificar a la harina de mezquite como un alimento con mayor índice glucémico.



**Tabla 16.** Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk de la composición nutricional de harinas de mezquite por molienda en licuadora y en molino pulverizador.

Tipo de molienda	Prueba de Shapiro Wilk						
	Componente	N	Parámetros normales		Estadístico de prueba	g.l	Sig. (bilateral)
			Media	Desviación estándar			
Licuadora	Contenido energético	3	170.9700	.04583	.893	3	.363
	Hidratos de carbono	3	24.2767	.05207	.996	3	.878
	Azúcares	3	7.4867	.01764	.964	3	.637
	Proteínas	3	12.4000	.04933	.990	3	.806
	Lípidos	3	2.1600	.02082	.942	3	.537
	Fibra	3	16.9667	.06667	.750	3	.000
	Cenizas	3	3.1233	.00882	.964	3	.637
	Humedad	3	.1000	.00577	1.000	3	1.000
Molino pulverizador	Contenido energético	3	198.7167	.28916	.900	3	.384
	Hidratos de carbono	3	26.1767	.04702	.848	3	.235
	Azúcares	3	10.1833	.01202	.923	3	.463
	Proteínas	3	11.7700	.06658	.910	3	.417
	Lípidos	3	2.8967	.03180	.997	3	.900
	Fibra	3	17.2533	.06360	.824	3	.174
	Cenizas	3	3.4533	.02906	.987	3	.780
	Humedad	3	.1033	.00333	.750	3	.000

**Tabla 17.** Prueba t para muestras relacionadas de la composición nutricional de harinas de mezquite por molienda en licuadora y en molino pulverizador.

Prueba t Student para muestras relacionadas									
	Componente	Diferencias relacionadas					t	g.l	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación estándar	Error típico de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Licuadora y molino pulverizador	Contenido energético	-27.7466	.5173	.2986	-29.0317	-26.4615	-92.897	2	.000
	Hidratos de carbono	-1.9000	.1322	.0763	-2.2286	-1.5713	-24.877	2	.002
	Azúcares	-2.6966	.0513	.0296	-2.8241	-2.5691	-91.020	2	.000
	Proteínas	.6300	.1967	.1135	.1413	1.1186	5.547	2	.031
	Lípidos	-.7366	.0378	.0218	-.8307	-.6426	-33.702	2	.001
	Fibra	-.2866	.0115	.0066	-.3153	-.2579	-43.000	2	.001
	Cenizas	-.3300	.0435	.0251	-.4382	-.2217	-13.113	2	.006
	Humedad	-.0033	.0152	.0088	-.0412	.0346	-.378	2	.742

### 4.3. Isotermas de sorción

En la Tabla 18 se observa que los valores de contenido de humedad en equilibrio en función de la actividad de agua, de harinas de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) fueron disminuyendo de 30 a 35°C y aumentando de 40 a 45°C, dichos valores de humedad se vieron reflejados por un entrecruzamiento de las isotermas de adsorción en todo el rango de la actividad de agua a las cuatro temperaturas, esto posiblemente a la cercanía del rango de temperaturas utilizado y disolución de los solutos (Labuza y Altunakar, 2007), no obstante algunos estudios han reportado entrecruzamientos en función de la temperatura en actividades de agua por encima de 0.7 para productos con altos contenidos de azúcar (Bronlund y Paterson, 2004).

**Tabla 18.** Valores de equilibrio de adsorción de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*).

Temperatura	30°C		35°C		40°C		45°C	
SAL	$a_w$	$X_{eq}$	$a_w$	$X_{eq}$	$a_w$	$X_{eq}$	$a_w$	$X_{eq}$
<i>KOH</i>	0.0754	0.0943	0.0674	0.0625	0.0604	0.0693	0.0544	0.0823
$M_gCl_2(6H_2O)$	0.3234	0.1105	0.3182	0.0838	0.3132	0.0947	0.3084	0.1067
$M_g(NO_3)_2$ * $6H_2O$	0.5257	0.1466	0.5157	0.1112	0.5063	0.1164	0.4972	0.1156
<i>KI</i>	0.6801	0.2037	0.6709	0.1992	0.6620	0.1594	0.6535	0.2262
<i>NaCl</i>	0.7524	0.3843	0.7432	0.3499	0.7345	0.3378	0.7260	0.3408
<i>KCl</i>	0.8379	0.4931	0.8216	0.4981	0.8060	0.4299	0.7912	0.4328
$K_2SO_6$	0.9697	0.969	0.9668	0.9245	0.9640	1.0202	0.9613	1.0991

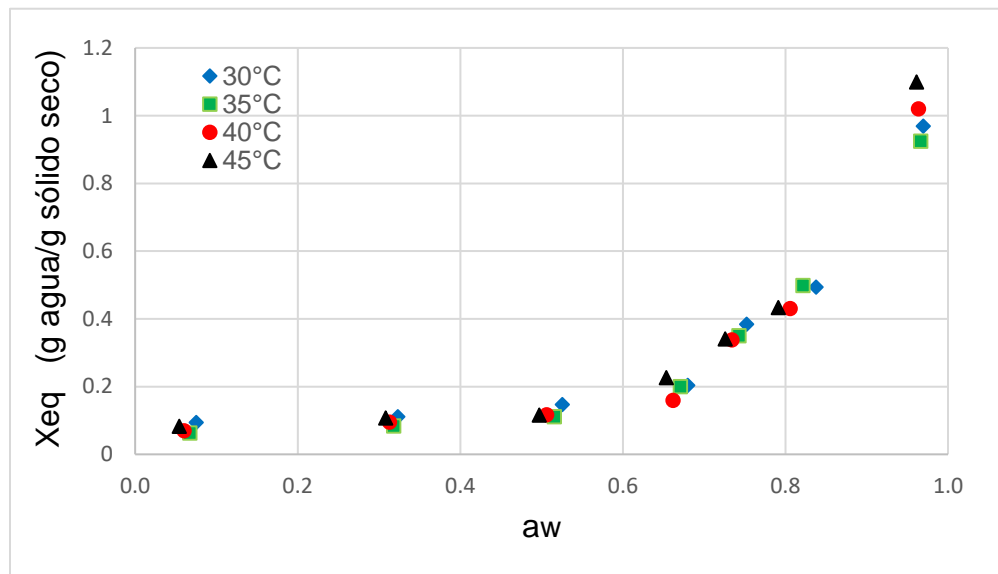
$a_w$ : actividad de agua;  $X_{eq}$ : contenido de humedad (g agua/g sólido seco)

En la Figura 19 se muestran las isotermas de adsorción de humedad en equilibrio vs  $a_w$  a las cuatro temperaturas de trabajo, donde el contenido de humedad aumentó conforme la actividad de agua incrementaba, siendo este comportamiento cada vez más acentuado a partir de una actividad de agua igual a 0.5, por tanto, se obtuvieron isotermas de adsorción de forma sigmoidea tipo II, que indicaron una adsorción física en multicapas.

La isoterma de tipo II pertenece a las cinco establecidas por la clasificación de Brunauer, Deming y Troller, la cual se considera común en diferentes alimentos en polvo (Leung, 1986; Erbas, 2005). Las isotermas obtenidas, presentan una pendiente leve, formando un punto de inflexión a baja  $a_w$  y un incremento exponencial a alta  $a_w$ . Se observó que la isoterma de adsorción de harina de mezquite presentó las tres regiones características de una isoterma sigmoidea: la región I correspondiente a una  $a_w$  menor a 0.22, que da lugar a la adsorción de agua en la capa monomolecular ( $X_0$ ), la región II entre 0.22-0.73 que da una adsorción

de agua en capas de adición a la ( $X_0$ ) y la región III para  $a_w$  entre 0.7-1 donde se aprecia una condensación de agua en los poros del material con una posterior solubilidad del sistema (Van Den Berg y Bruin, 1981). A partir de una actividad de agua de 0.6, la pendiente de la curva incrementó, lo cual significa que, si la harina se almacenara a valores de humedad relativa por arriba del 60%, provocaría una disolución del producto en agua, con cambios físicos y químicos en las moléculas que conforman a la harina de mezquite y su estructura (Lagoudaki *et al*, 1993). De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden considerar como condiciones óptimas para el almacenamiento de harina de mezquite, una humedad relativa por debajo de 30%, con un contenido de humedad inferior a 0.08 g agua/g sólido seco.

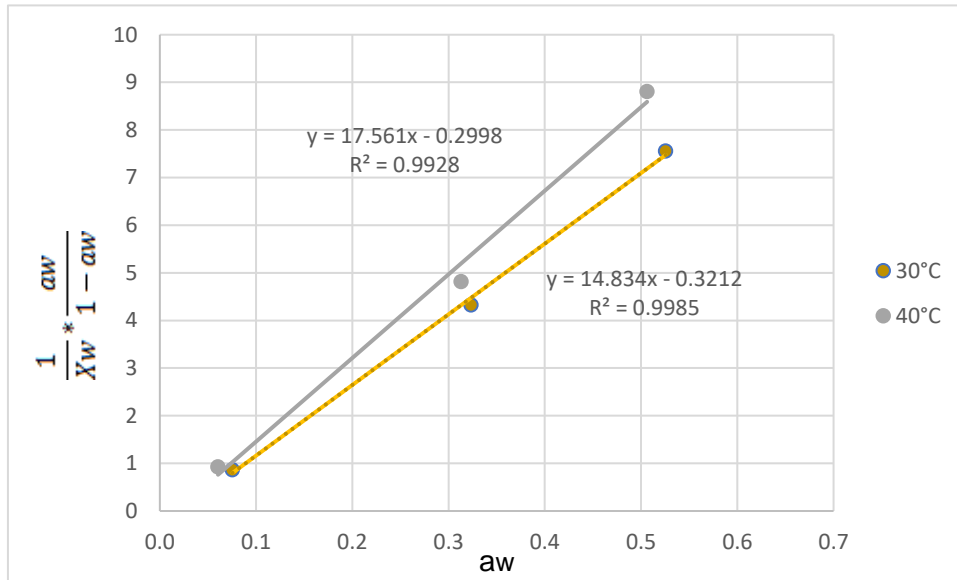
Por otra parte, no se identificó una dependencia del contenido de humedad en equilibrio de la harina de mezquite a temperaturas cercanas de 30 a 35°C, no obstante, se observó una disminución en la capacidad de adsorción de agua de la harina, al aumentar la temperatura de 30 a 40°C, hasta valores de  $a_w < 0.65$ . Este comportamiento se atribuye a que las interacciones de los componentes con el agua se redujeron (menor energía de enlace) con la superficie de adsorción.



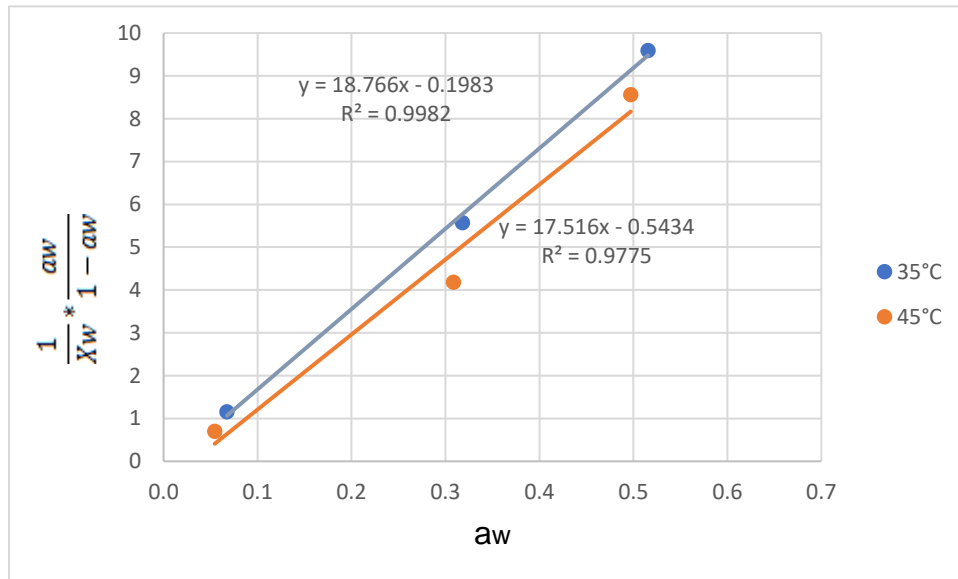
**Figura 19.** Isotherma de adsorción de harina de mezquite (*Prosopis laevigata*) a 30, 35, 40 y 45°C.

#### 4.3.1. Modelo BET

En la Figura 20 y 21 se muestran los datos de adsorción lineales de harina de mezquite para cada actividad de agua en las cuatro temperaturas de trabajo, los cuales fueron aplicables de acuerdo a la ecuación BET (Ecuación 8). Para la elaboración de los gráficos se tomaron los datos de equilibrio que solo presentaron un comportamiento lineal, no obstante, los valores estuvieron en un rango limitado de  $a_w$  de 0.07 a 0.51.



**Figura 20.** Ajuste de la ecuación BET lineal para harina de mezquite a 30 y 40°C.



**Figura 21.** Ajuste de la ecuación BET lineal para harina de mezquite a 35 y 45°C.

En la Tabla 19 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los parámetros del modelo BET y su coeficiente de correlación ( $r^2$ ). El parámetro de contenido de humedad de la monocapa ( $X_m$ ) de la harina de mezquite (*Prosopis laevigata*) se encontró alrededor de 0.06-0.07 g agua/g sólido seco, y fue disminuyendo conforme aumentó la temperatura. Esto significa que el valor de la monocapa que se formó en la harina de mezquite está por debajo de la  $a_w$  y contenido de humedad más bajo, por lo que se deduce que a mayor temperatura existe menor disponibilidad de los sitios activos en las harinas de mezquite para su unión con el agua (Westgate *et al*,1992). Las constantes de C mostraron un incremento conforme se aumentó la temperatura, lo que concuerda con el tipo de isoterma II resultante para las harinas de mezquite, debido a que el punto de inflexión de la isoterma solo aparece para valores de  $C > 2$ , como lo muestra la Tabla 19. El modelo de BET presentó un  $r^2$  por arriba de 0.98, por lo que se ajustó adecuadamente.

**Tabla 19.** Parámetros del modelo BET para harina de mezquite.

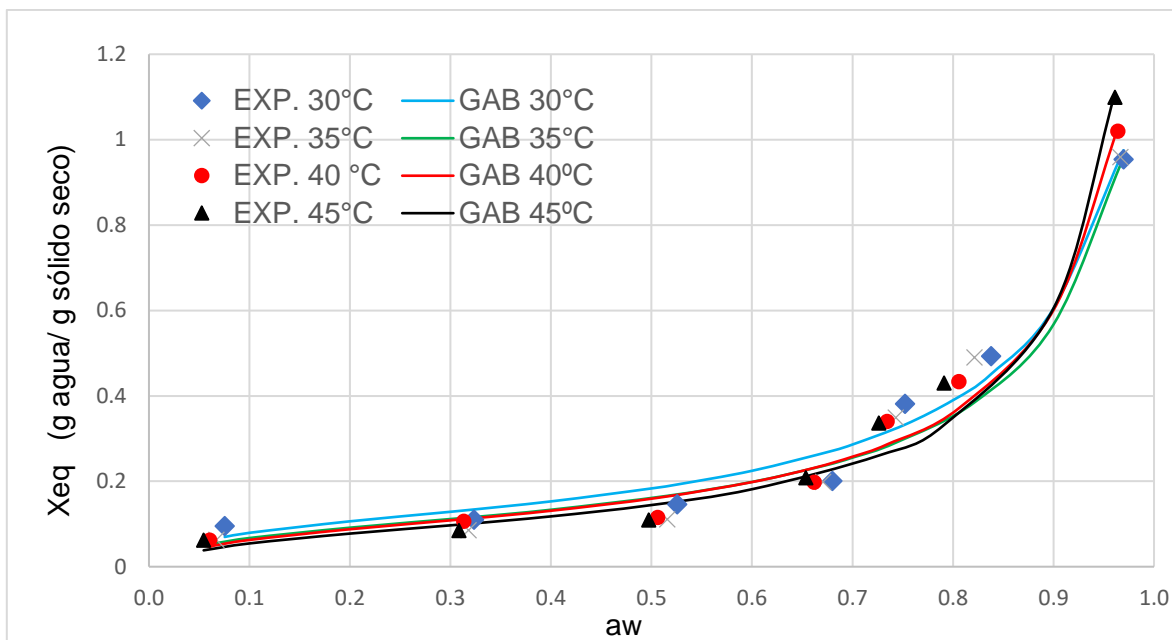
MODELO	Parámetros	Temperatura °C			
		30	35	40	45
BET	$X_m$ (g agua/g sólido seco)	0.0789	0.0678	0.0661	0.0654
	C	60	85	94.18	104.34
	$r^2$	0.9847	0.9923	0.9849	0.9856

$X_m$ =Valor de monocapa,  
C=Constante del modelo BET  
 $r^2$ =Coeficiente de correlación

#### 4.3.2. Modelo de sorción GAB

En la Figura 22 se presenta el ajuste al modelo GAB de humedades de equilibrio de harinas de mezquite a las cuatro temperaturas, donde se observó un mejor ajuste con este modelo, debido a un nulo entrecruzamiento de las curvas con el aumento de la temperatura. Asimismo, las isoterma de adsorción con el modelo GAB presentaron un comportamiento Sigmoidal tipo II. Se presentó una clara dependencia del contenido de humedad en equilibrio con respecto a la temperatura de las curvas modeladas, donde el contenido de humedad disminuyó al aumentar la temperatura. No obstante, las curvas a 35 y 40°C fueron similares mostrando un ligero entrecruzamiento.

Se observó un aumento del contenido de humedad conforme la actividad de agua aumentaba. A un valor mayor de la monocapa ( $a_w > 0.514$ ), la pendiente de la isoterma de adsorción incrementó, y a una actividad de agua de 0.8 el entrelazamiento de las curvas fue mayor.



**Figura 22.** Isotherma de adsorción de harina de mezquite (*Prosopis laevigata*) a 30,35,40 y 45°C, ajustadas al modelo GAB.

En la Tabla 20 se observa que los valores de monocapa ( $X_m$ ) indicaron una dependencia con la temperatura, los cuales decrecieron con el aumento la temperatura, y se interpretaron como una disminución de la entalpía de adsorción y unión en la primera capa. El valor de contenido de humedad de la capa monomolecular puede definir las condiciones de almacenamiento, donde la harina es más estable. La constante C para el modelo GAB representó la fuerza de enlace del agua sobre los sitios primarios de enlace, siendo común un valor por arriba de 1. Los valores de C para las harinas de mezquite disminuyeron con el aumento de la temperatura entre 22.19 a 15.24, por lo cual se dedujo que la diferencia de entalpía disminuyo entre la unión de las moléculas de la monocapa y moléculas de la multicapa. Con respecto a los valores de k, estos presentaron valores aproximadamente a 1, asumiendo que para las harinas de mezquite no hay distinción entre moléculas multicapa y moléculas líquidas. El modelo GAB presentó un mejor ajuste de los valores experimentales para todo el rango de actividad de agua a las cuatro temperaturas, a comparación del modelo BET, con un ( $r^2$ ) mayor a 0.96% y un (s) menor a 0.07.

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre los valores de sorción y el modelo GAB de ajuste para harinas de mezquite, se recomiendan las siguientes condiciones de almacenamiento con el fin de evitar su deterioro: humedad relativa menor al 30% y temperatura máxima de 45°C.

**Tabla 20.** Parámetros del modelo GAB para harina de mezquite.

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)			
		30	35	40	45
GAB	Xm	0.1039	0.0905	0.0894	0.0824
	C	22.1997	19.9075	16.6142	15.2432
	k	0.9219	0.9355	0.9475	0.9656
	$r^2$	0.9898	0.9772	0.9817	0.9773
	s	0.0555	0.0741	0.0592	0.0703

Xm=Valor de monocapa  
 C y k=constantes para el modelo  
 $r^2$ = coeficiente de correlación  
 s = error estándar

#### 4.3.3. Modelo de sorción GAB con constantes entrópicas y entalpías de dependencia de temperatura

Las constantes entrópicas son denominadas  $Cg_0$  y  $K_0$ , mientras que las entalpías o energía de diferenciación entre la monocapa, multicapa y volumen líquido se denominan  $\Delta H_{Cg}$ ,  $\Delta H_K$  y  $\Delta H_X$ . Estos parámetros termodinámicos caracterizan el proceso de sorción cuando un aumento de temperatura induce a una reducción del contenido de humedad de equilibrio en una actividad específica del agua. En la Tabla 21 se muestran los valores de los 6 parámetros de dependencia de la temperatura de sorción de las harinas, incorporadas con el modelo GAB.

La constante  $X_{mo}$  que expresan la dependencia de temperatura del contenido de humedad de la monocapa  $X_m$ , disminuyó conforme la temperatura, debido a que la energía de unión entre las moléculas disminuyó, lo que corroboró su dependencia.

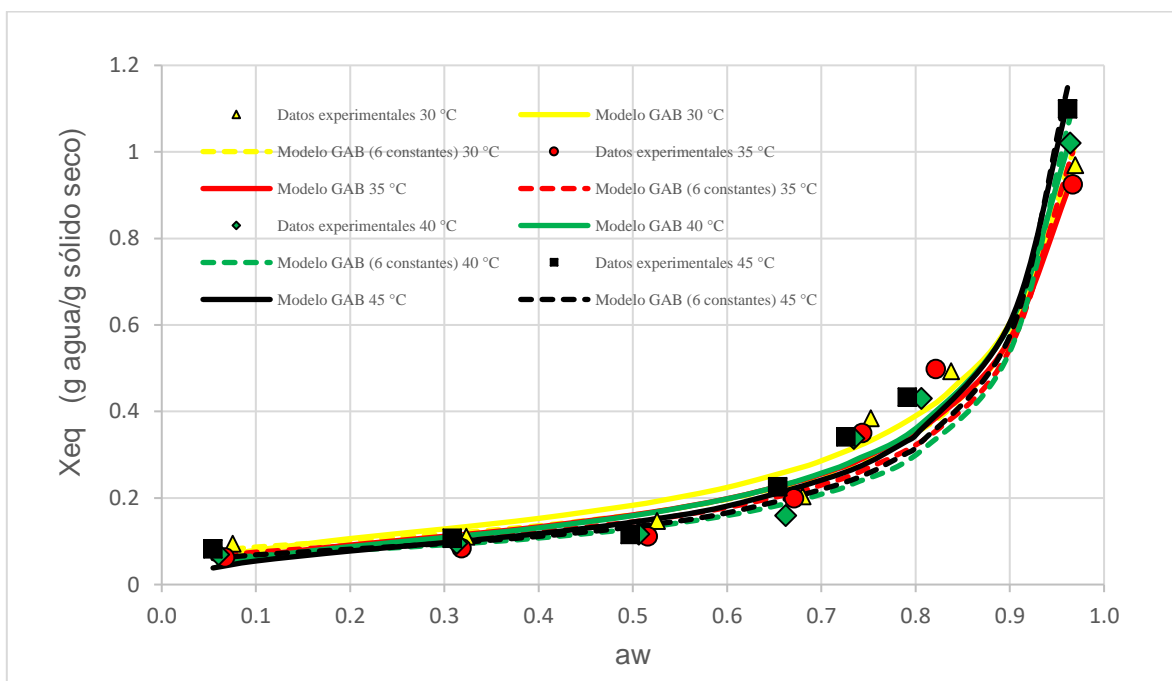
El valor de  $\Delta H_{Cg}$  resultó ser positivo y aumentó según la temperatura, esto debido a la interacción exotérmica del agua con los sitios de sorción primaria entre la monocapa y multicapa. Los valores de  $\Delta H_K$  fueron negativos y bajos, lo cual significa que las moléculas de la multicapa de las harinas de mezquite son menos enlazadas y representan una pequeña diferencia del calor de condensación del agua y el calor de sorción de la capa multimolecular (Quirijins *et al*, 2005).

Por otra parte, los valores de naturaleza entrópica de  $Cg_0$  fueron mayores que 1, de acuerdo a Quirijins *et al*, (2005), estos valores deben ser menores que 1 debido a que las moléculas de agua prefieren estar en la multicapa que en la monocapa; esto probablemente haya ocurrido debido a que la harina de mezquite presenta mayor saturación de moléculas de agua y sitios activos que inclusive en la multicapa. En cuanto a los valores de  $K_0$  mostraron ser mayores que 1, significando una alta entropía de las moléculas en el volumen mayor de líquido. Los valores de las constantes entrópicas confirmaron la dependencia de la temperatura de sorción de las harinas de mezquite.

**Tabla 21.** Constantes entrópicas y entalpías de dependencia del modelo GAB para harina de mezquite.

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)			
		30	35	40	45
GAB	$X_{mo}$	0.08	0.07	0.06	0.05
	$C_{go}$	100.12	70.38	80.14	80.16
	$K_o$	51.96	50.09	48.84	50.10
	$\Delta H_{Cg}$	2.71	10.82	12.32	16.00
	$\Delta H_K$	-10096.77	-10135.73	-10190.30	-10402.29
	$\Delta H_X$	182.90	238.42	286.58	603.42
	$r^2$	0.9837	0.9686	0.9777	0.9789
	s	0.1380	0.1889	0.1733	0.1790

En la Figura 23 se muestra una comparación de datos experimentales de sorción, modelo GAB de sorción y el modelo GAB con 6 parámetros, donde se observó una similitud entre los dos modelos, con un  $r^2$  de 0.96-0.98 y s de 0.13-0.17. Las curvas de los modelos se ajustaron adecuadamente hasta una actividad de agua de 0.7. Las curvas muestran que el modelo matemático que presenta un mejor ajuste es el de GAB de sorción ( $r^2 > 0.97$ ) y ( $s < 0.07$ ). Este modelo para las harinas de mezquite, es el adecuado para la predicción de valores de contenido de humedad en monocapa, así como las posibles condiciones de almacenamiento.



**Figura 23.** Modelado de datos experimentales de sorción de harinas de mezquite a 30,35,40 y 45°C por modelo GAB de sorción y GAB con 6 parámetros (constantes entrópicas y entalpías).

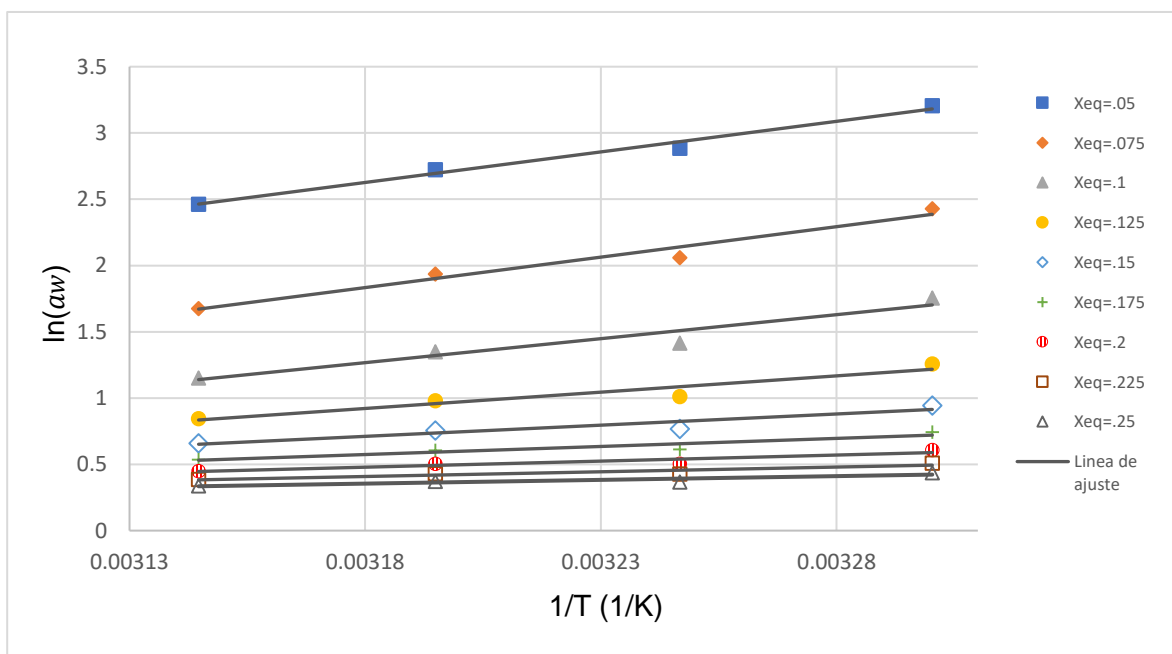


## 4.4 Calor isostérico de sorción

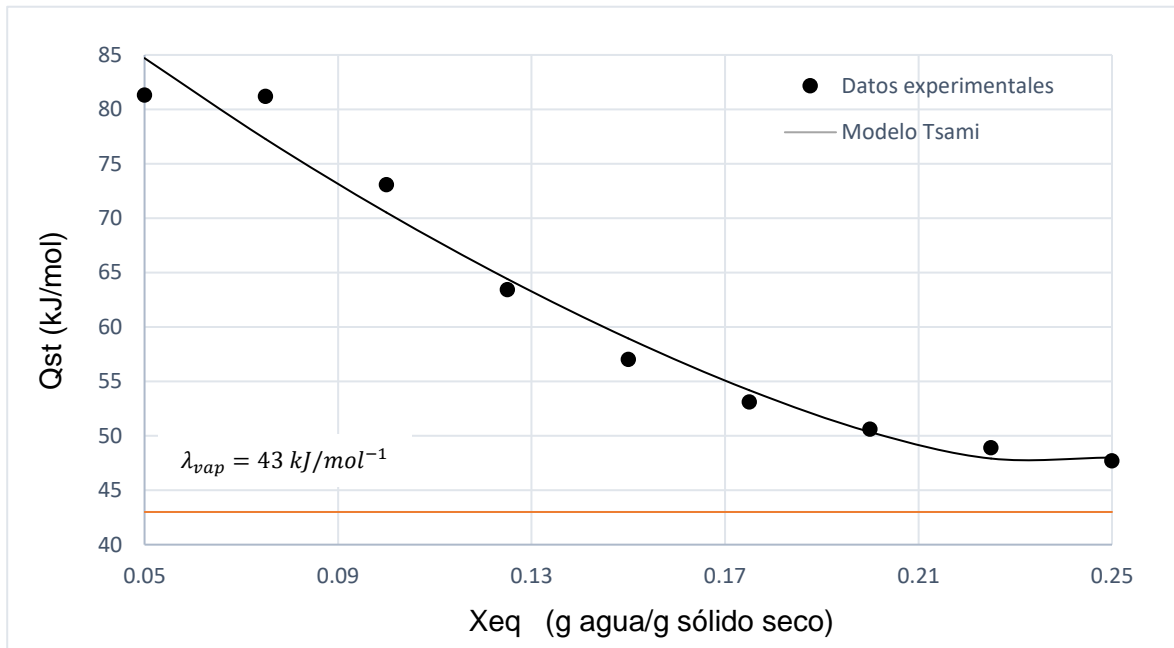
En la Figura 24 se observa que los datos graficados siguen el comportamiento lineal de la ecuación derivada de Clausius Clapeyron para las cuatro temperaturas. Se muestra una disminución de las pendientes conforme aumenta el  $X_{eq}$  (g agua/g sólido seco). En la Figura 25 se muestra la evolución del calor isostérico ( $Q_{st}$ ) en función del contenido de humedad ( $X_{eq}$ ) de la harina de mezquite (*Prosopis laevigata*), la cual determina el calor requerido para evaporar el agua en la región higroscópica para un contenido de humedad dado.

Se observó que el  $Q_{st}$  disminuyó rápidamente con el aumento de  $X_{eq}$ . El punto más alto de  $Q_{st}$ , se presentó a 81.3 kJ/mol para una humedad de 0.05 g agua/g sólido seco, lo cual significa que se necesita aproximadamente el doble de la energía de vaporización del agua para remover el agua de la harina de mezquite. Así entonces, el alto valor del calor isostérico a bajo contenido de humedad indica sitios polares altamente activos en la superficie de la harina, que se saturarían con moléculas de agua de la monocapa (Tsami, 1991; Garcia-Pérez *et al*, 2008; Eim *et al*, 2011).

Por lo tanto, para la harina de mezquite se requiere de una cantidad elevada de energía para eliminar el agua de la harina (Al-Muhtaseb *et al*, 2004). El valor más bajo de  $Q_{st}$  a 47.69 kJ/mol y 0.25 de  $X_{eq}$  indican una menor interacción o menor ocupación del agua en sitios activos de la superficie de la harina, lo que indica que a un valor de humedad mayor se necesitaría menos energía para eliminar el agua de la harina, asumiéndose como una disminución de las fuerzas de enlace (Gálvez *et al*, 2006).



**Figura 24.** Gráfico lineal para calor isostérico a temperaturas constantes de 30, 35, 40 y 45°C.

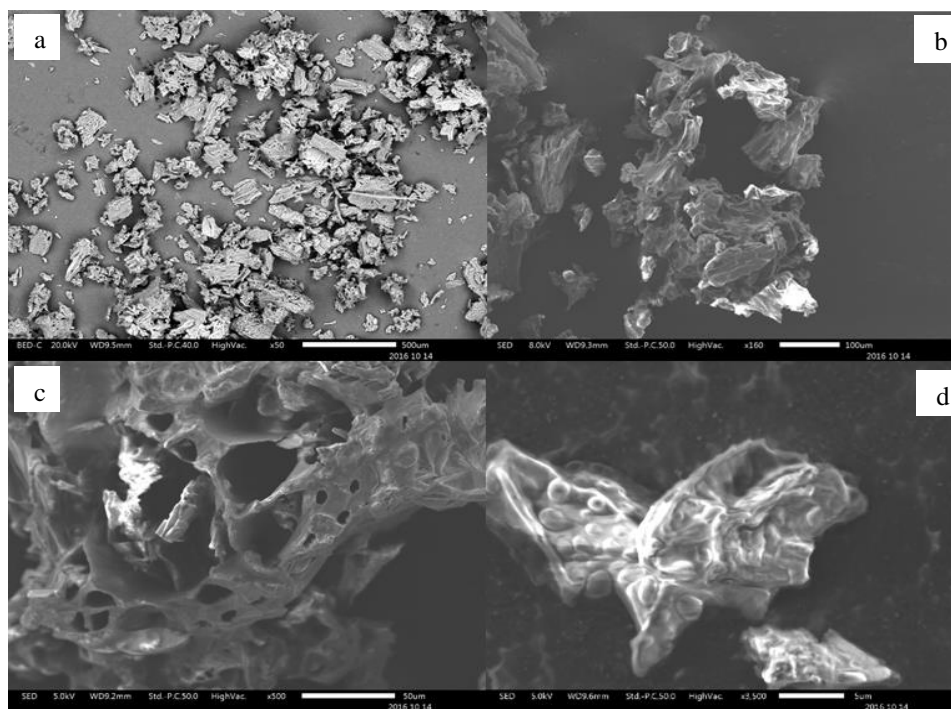


**Figura 25.** Calor isostérico de sorción en función del contenido de humedad de harinas de mezquite a temperaturas constantes de 30, 35, 40 y 45°C.

Para un contenido de humedad mayor a 0.25 (g agua/ g sólido seco), el calor isostérico está por arriba del calor de vaporización del agua pura (aprox. 43 KJ/mol), lo cual indica que si hay una diferencia mayor en el requerimiento de energía para eliminar el agua de las harinas mezquite. En el caso de *Prosopis alba* y *Prosopis negra* (León *et al*, 2012) para harinas procesadas a 20, 30 y 40 °C con un contenido de humedad > 0.30 (g agua/ g sólido seco) el calor isostérico tiende a cero; no obstante, con un Xeq menor, la cantidad de energía necesaria para eliminar el agua es elevada; lo cual fue similar con los datos de esta investigación. La variación del calor isostérico de sorción con el contenido de humedad en equilibrio resultó en un buen ajuste para las harinas de mezquite con un  $r^2$  de 0.97 y s de 0.018 (Tsami, 1990).

## 4.5 Morfología de harinas de mezquite

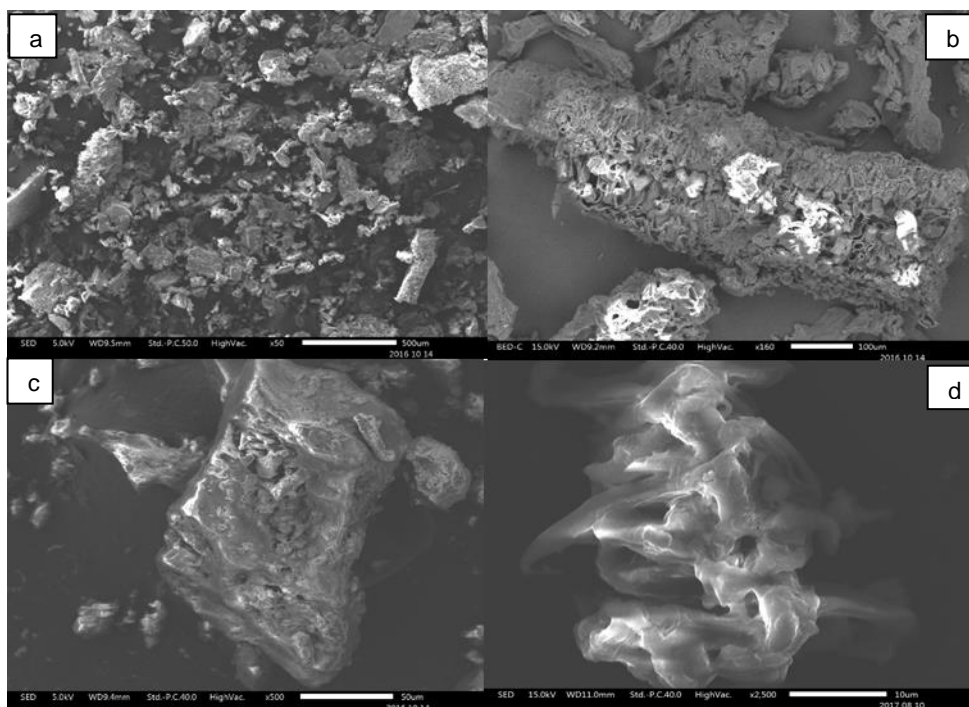
En las Figuras 26 a 31 se pueden observar imágenes por MEB de muestras de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*), con las siguientes características morfológicas:



HML1: Muestra 1 de harina de mezquite molida en licuadora.

**Figura 26.** Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora (HML1).

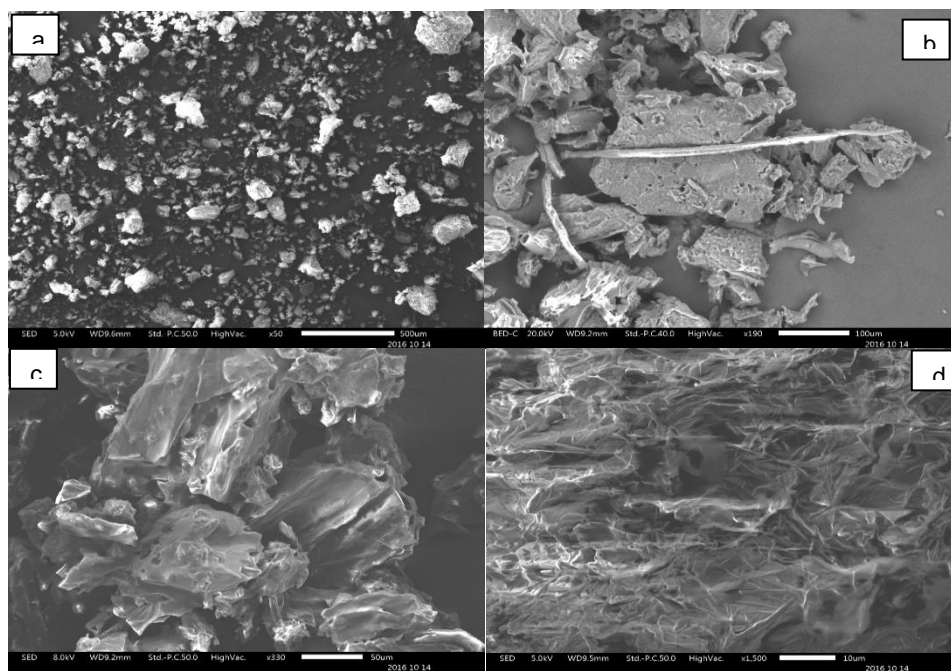
En la Figura 26 se observa que la imagen a) 50x, presenta partículas de formas irregulares y tamaños heterogéneos, así como filamentos fibrosos en forma de “palillos delgados” de aprox. 500 micras, también se muestran partículas porosas y rasgadas, algunas entrelazadas con otras partículas pequeñas; b) 160x, la partícula presenta una forma irregular, angular y de baja esfericidad. Se observa una partícula organizada como un tejido amarrado o entrelazado con partículas más pequeñas, formando un aglomerado, tortuoso, rocoso; parecido a una matriz proteica; c) 500x, se observa la cara exterior de un lado de una partícula de harina de mezquite la cual presenta una clara porosidad, así como una estructura fibrosa, irregular y de conformación tortuosa; d) 3500x, se puede apreciar una partícula con un ligero aglomeramiento en sus partes, sin tortuosidad, con pequeñas partículas adheridas a una partícula de mayor tamaño, lo que caracteriza a un polvo cohesivo.



HML2: Muestra 2 de harina de mezquite molida en licuadora.

**Figura 27.** Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora (HML2).

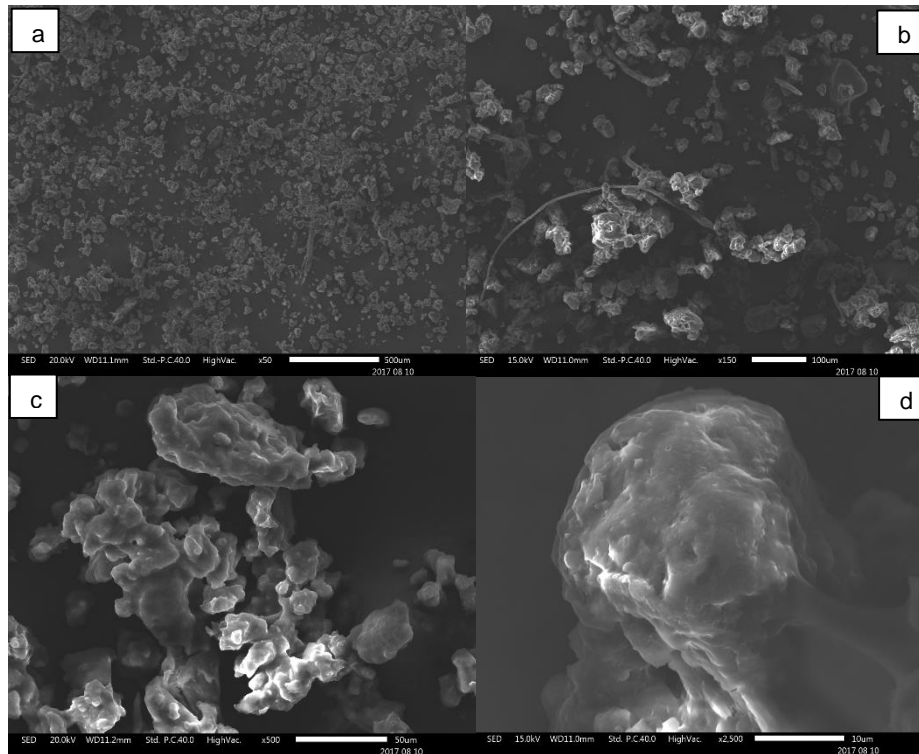
En la Figura 27 se observa que la imagen a) 50x, presenta partículas con formas angulares y algunas con estructuras laminares, la mayor cantidad de partículas son diferentes y de gran tamaño; b) 160x, se muestra una partícula alargada y laminar, muy tortuosa, fibrosa y con cavidades, donde se puede apreciar una matriz saturada de tubos entrelazados o canales entre sí, así también se observan otras partículas aglomeradas que forman gránulos, con formas irregulares y rígidas. Estas características influyen en la cohesión, fluidez y adsorción de humedad de los polvos; c) 500x, revela una partícula laminar, con una forma angular e irregular y una estructura rígida, se aprecia que la partícula de mayor tamaño se aglomera con otras pequeñas, esto debido a la existencia de polaridad y de fuerzas intermoleculares que permiten la atracción de las mismas (Kresisch, 2016); d) 2500x, se puede observar una partícula irregular en su totalidad con diferentes cortes en su estructura, las harinas de mezquite al poseer este tipo de partículas pueden influir en la fluidez del polvo.



HML3: Muestra 3 de harina de mezquite molida en licuadora.

**Figura 28.** Partículas de harina de mezquite por molienda en licuadora (HML3).

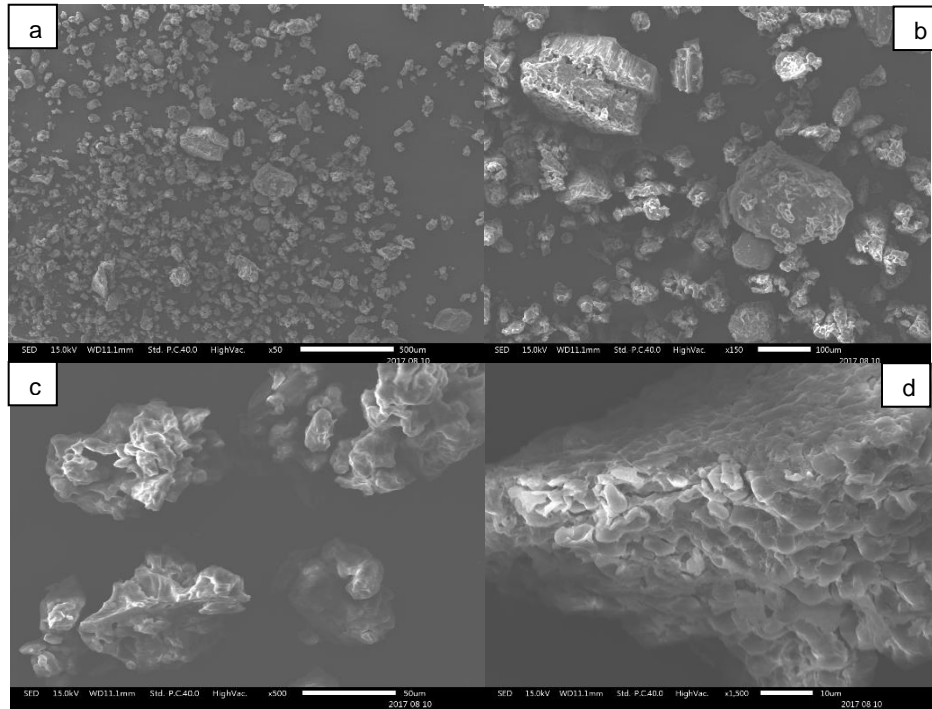
En la Figura 28 se observa que la imagen a) 50x, presenta partículas de harinas de mezquite más homogéneas en su tamaño y forma, sin embargo se pueden apreciar algunas partículas que exceden su tamaño; b) 190x, en esta imagen se puede apreciar que las partículas de harina tienen diferentes formas entre laminares, irregulares, alargadas y filamentosas, esto debido al tipo de molienda utilizada para las vainas, así también se observan partículas con estructuras rígidas parecidas a placas de polvo compacto; c) 330x, se observa un claro comportamiento de entrelazamiento con partículas de la misma forma y rocosidad y se aprecian pequeños espacios vacíos o poros en las partículas; d) 1500x, se puede visualizar una partícula que conforma un tejido fibroso, como una red tortuosa por presencia de polisacáridos, proteína y azúcares simples.



HMP1: Muestra 1 de harina de mezquite molida en molino pulverizador.

**Figura 29.** Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP1).

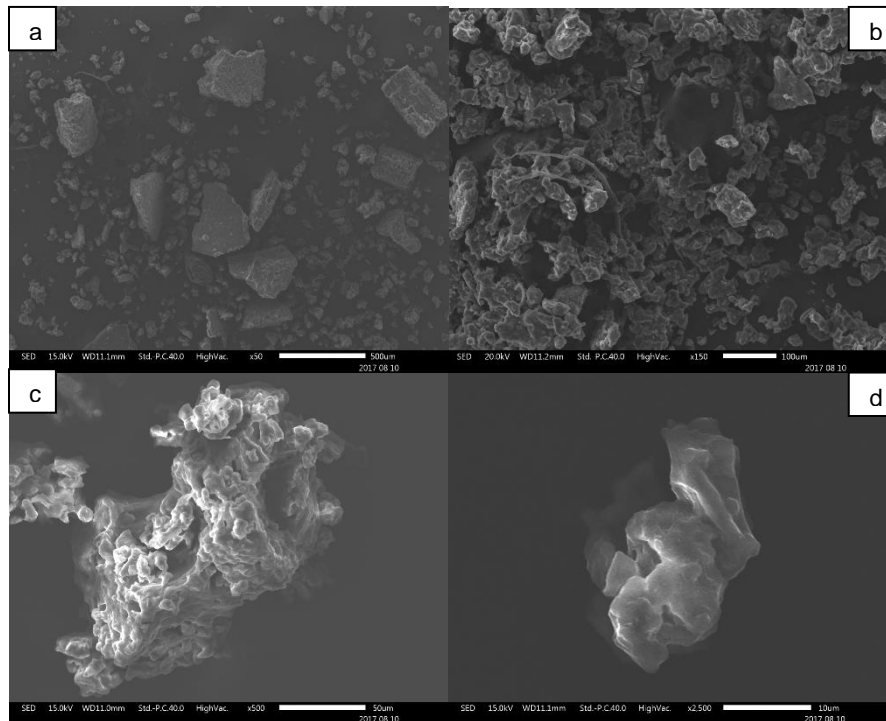
En la Figura 29 se observa que la imagen a) 50x, revela partículas de menor tamaño, con partículas más homogéneas y similares en tamaño; aun con formas irregulares, no obstante las partículas son más definidas y con estructura ligeramente redondeada; en la imagen b) 150x, las partículas muestran un menor tamaño, por lo cual tienden a entrelazarse unas con otras, por lo que se aprecian algunos aglomerados; c) 500x, se observa una matriz de partículas entrelazadas, lo cual indica que hay un comportamiento higroscópico y de aglomeración; esto se puede deber al calor suministrado durante la molienda de las vainas, por la fuerza de trituración del equipo, siendo este un factor importante cuando hay presencia de azúcares y fibras; d) 2500x, se puede apreciar la parte superficial de una partícula de harina con estructura redondeada, mejor definida, sin partes rocosas, ni cortes forzados.



HMP2: Muestra 2 de harina de mezquite molida en molino pulverizador.

**Figura 30.** Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP2).

En la Figura 30, la imagen a) 50x, presenta partículas con tamaños homogéneos y con formas redondeadas pero angulares, a comparación de las harinas por licuadora que presentaron heterogeneidad; la imagen b) 150, muestra estructuras porosas, y se observan algunas partículas de mayor tamaño se con un tejido fibroso y levemente aglomerado; c) 500x, se observan formas irregulares con cortes deformados y redondeados en las paredes de las partículas; d) 1500x, esta partícula de harina muestra la conformación de su masa, con un tejido interconectado parecido a una “esponja”, tortuoso y con una clara visión de canales o túbulos por donde ocurre la adsorción de moléculas de agua, así como la respiración de la materia orgánica.



HMP3: Muestra 3 de harina de mezquite molida en molino pulverizador.

**Figura 31.** Partículas de harina de mezquite por molino pulverizador (HMP3).

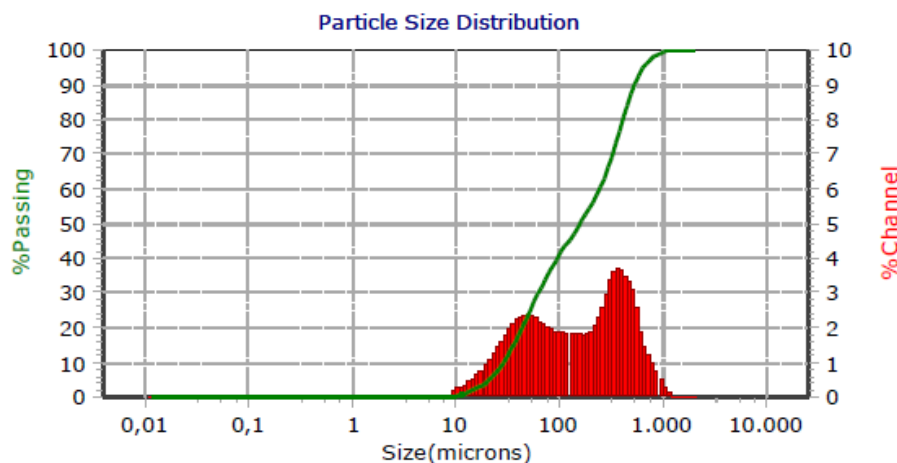
En la Figura 31 se observa que la imagen a) 50x, muestra algunas partículas con forma laminar, que no consiguieron triturarse por completo, sin embargo no se observa aglomeración en estas partículas, mientras que las de menor tamaño si logran interactuar por fuerzas de Van der Waals; en la imagen b) 150x, se muestra que las partículas tienen mayor interacción entre ellas, por lo que no se visualiza una separación, sino un comportamiento de apelmazamiento y endurecimiento; las imágenes c) 500x y d) 2500x, revelan partículas de forma irregular, porosas y fibrosas con una adhesión de partículas más pequeñas.



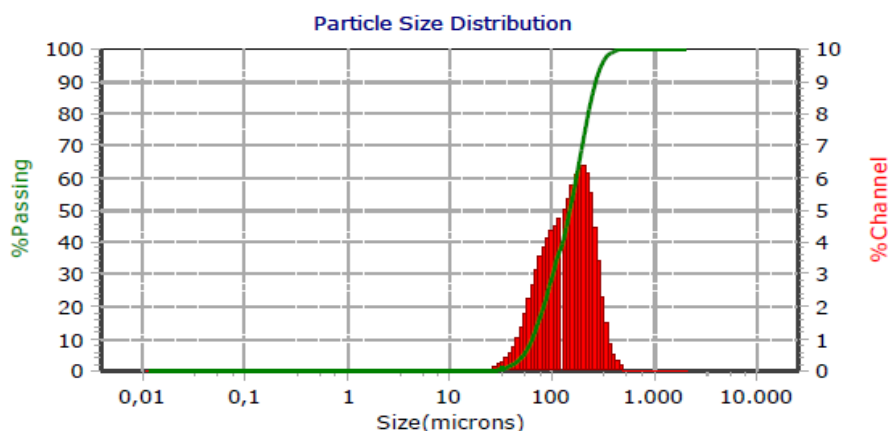
## 4.6. Distribución de tamaño de partícula

En la Figura 32 se muestra la distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por licuadora. Se observa una distribución heterogénea de las partículas, con dos oblaciones para la muestra. Los tamaños de partículas se encuentran en un rango de 10 a 1000 micras que pasaron por las mallas del equipo en un 100%, y un 95% en partículas con un tamaño de 657 micras. Las partículas más finas se presentaron con un tamaño de 8.48 micras y un acumulado al 10% de 28.93 micras. Los diámetros promedio de partículas de las dos oblaciones identificadas fueron de 318.3 micras con un volumen de 62.3% y 42.04 micras con un volumen de 37.7%. Los tamaños de partícula no son los adecuados para poder considerarse una harina; además que estos tamaños de partícula pueden provocar un comportamiento químico y físico no deseado en el almacenamiento y vida útil del producto final.

En la Figura 33 se presenta la distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por molino pulverizador. Se observó que durante el experimento la muestra de harina se dispersó fácilmente con la simple agitación del recirculador sin formar agregados. Se obtuvo una única distribución de forma Gaussiana, donde se identificaron partículas tan grandes hasta las 497 micras, con un acumulado al 95% de 302.5 micras, mientras que las partículas finas se observaron a partir de 28.53 micras con un acumulado al 10% de 64.23 micras. El diámetro promedio de la muestra total de harina fue de 147.7 micras. Esta harina presento una distribución homogénea y con tamaños de partículas adecuadas para denominarse como harina de acuerdo a la clasificación de Bhandari *et al* (2013), por lo cual es recomendable su aplicación para elaboración de galletas, pastas, masas para panes sin esponjar y tortillas; debido a que se requiere un tamaño de partícula de 200-350 micras para la elaboración de estos productos (López *et al*, 2011). Por otra parte, se observó una gran diferencia en el flujo y aglomeración de partículas entre las dos muestras.



**Figura 32.** Distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por molienda en licuadora.



**Figura 33.** Distribución de tamaño de partícula de harina de mezquite obtenida por molienda en molino pulverizador.

#### 4.7. Angulo de reposo y fluidez

En la Tabla 22 y 23 se muestran los valores promedio de ángulo de reposo y velocidad de flujo de harinas de mezquite. La velocidad de flujo de harinas de mezquite fue mayor para la harina obtenida a partir de la molienda en molino pulverizador, a diferencia de la harina con molienda en licuadora con un valor bajo. Los datos obtenidos reflejaron una relación entre la velocidad de flujo con el ángulo de reposo. De acuerdo a la clasificación mencionada por Shah *et al*, (2008), los valores de ángulo de reposo de ambas harinas fueron bajas y de flujo libre, no obstante, aunque las formas de las partículas fueron irregulares, dicha característica no influyo de manera negativa en el flujo de la harina (Peschl, 1989). Los factores que pudieron mejorar la fluidez de los dos tipos de harina, a partir del ángulo de reposo, fueron: a) las harinas al poseer tamaños de partícula superiores a las 100 micras estas fluyeron libremente debido a su baja cohesión, y b) las humedades de ambas harinas presentaron valores bajos, menores que el 10%, lo cual mejoro la velocidad de flujo de la muestra de harina. Al ser menor el ángulo que formó la pendiente con la horizontal del montículo de harina, las propiedades de flujo del material se consideraron mejores (Figura 34) (Schulze,1996).

**Tabla 22.** Velocidad de flujo de harina de mezquite con molienda en licuadora.

Muestra de harina (100 g)	Tiempo de caída (segundos)	Velocidad de flujo (g/s)	Diámetro de montículo (cm)	D <sub>a1</sub> (cm)	Φ <sub>rep</sub> (°)
FHML 1	120.12	0.83	10.3	10.3	1.32
FHML 2	118.46		10.5		
FHML 3	121.09		10.3		

**Tabla 23.** Velocidad de flujo de harina de mezquite con molienda en molino pulverizador.

Muestra de harina (100 g)	Tiempo de caída (segundos)	Velocidad de flujo (g/s)	Diámetro de montículo (cm)	D <sub>a2</sub> (cm)	Φ <sub>rep</sub>
FHMC 1	61.3	1.62	12.1	12.06	1.28
FHMC 2	60.9		11.9		
FHMC 3	62.2		12.2		



**Figura 34.** Determinación de ángulo de reposo y velocidad de flujo de harinas de mezquite.

## 4.8. Análisis por calorimetría de harina de mezquite

### 4.8.1 Extracción de fracciones de almidón y proteína de harina de mezquite

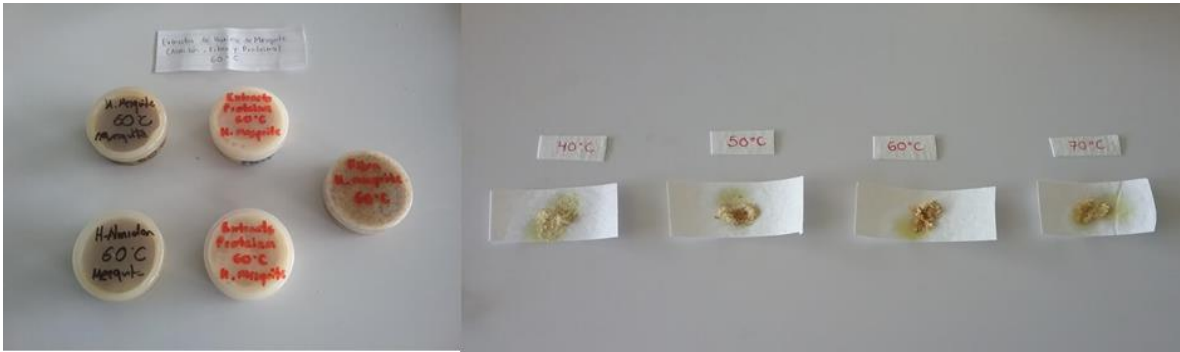
En la Tabla 24 se muestran los valores en gramos de proteínas y almidones obtenidos a partir de 20 g de harina de mezquite (*Prosopis laevigata*) molida por licuadora, donde se observa una mayor recuperación de proteína y almidón para las muestras a 40°C y a 60°C en diferentes concentraciones. No obstante, la relación en concentración 1:5 (harina de mezquite: agua) a 40°C, presentó una recuperación de fracciones de proteína y almidón mayor que las demás muestras.

**Tabla 24.** Recuperación de proteínas, almidón y fibra de harinas de mezquite a diferentes temperaturas.

Muestras 20 g	Relación Peso/volumen	Concentración de Bisulfito (%)	Tiempo de reposo	Recuperación promedio (g)	
				Proteína	Almidón
40°C	1:5	1	24 hrs	0.7338	0.7246
50°C	1:5	1	24 hrs	0.4292	0.3978
60°C	1:10	3	24 hrs	0.4860	0.4780
70°C	1:10	3	24 hrs	0.3902	0.3620

### Prueba de Lugol

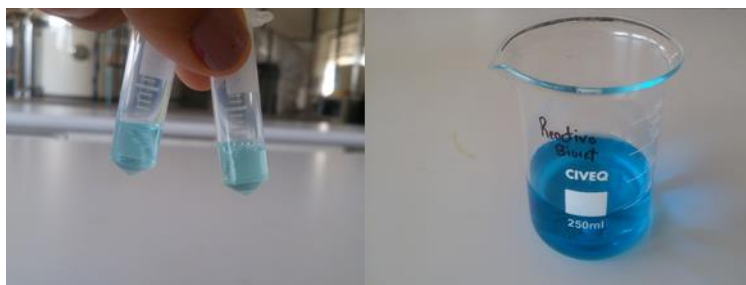
De acuerdo con la prueba de Lugol aplicada para los almidones recuperados de cada harina, estas presentaron un color ligeramente morado casi imperceptible a la vista, siendo este color un indicativo de presencia de almidones en la muestra (Figura 35). Sin embargo, se observó en mayor proporción un color amarillo intenso, lo que refiere una presencia de azúcares o polisacáridos diferentes al almidón.



**Figura 35.** Extracciones de proteína, fibra y almidón de harina de mezquite con secado a 60°C y pruebas de Lugol a diferentes temperaturas.

### Método Biuret: reactivo para proteína total

De acuerdo a la técnica de Biuret (Figura 36) aplicada a las proteínas extraídas de harina de mezquite, esta hizo reacción, tornándose la solución de un color verde y azul, hasta pasar a un color violáceo; por lo que se comprobó la presencia de enlaces peptídicos.



**Figura 36.** Prueba cualitativa de Biuret de harina de mezquite.

## 4.8.2 Termogramas de harinas de mezquite por calorimetría

### Curvas preliminares de DSC de harinas de mezquite sin tratamiento

Como parte de un previo análisis del comportamiento térmico de las harinas de mezquite; se realizaron pruebas en DSC.

#### Características y Condiciones:

Muestra: Harina de mezquite, 50 y 60°C, sin tratamiento

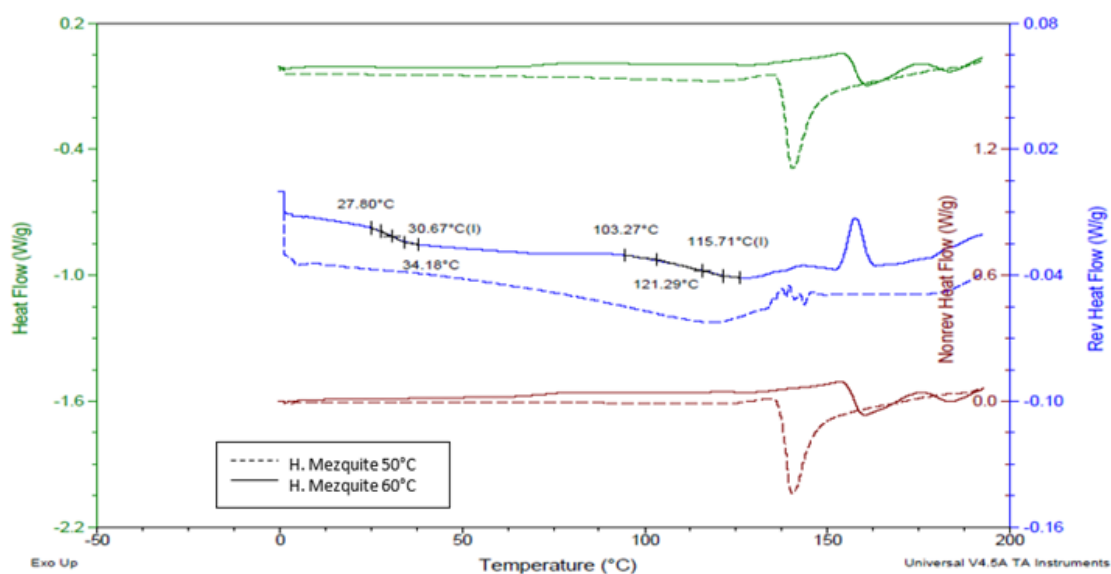
Tamaño de muestra: 17.800 mg

Contenido de humedad final: 0.06 g agua/ g materia seca

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 200°C

Temperatura Inicial: 0°C



**Figura 37.** Curvas de comparación de flujo de calor, reversibles y no reversibles de harinas de mezquite secadas a 50°C y 60°C.

En la Figura 37 las curvas de flujo de calor vs temperatura (verdes) de harinas de 50 y 60°C presentaron picos endotérmicos (fusión) mayores a los 140°C. La curva de flujo de calor no reversible a 60°C (línea sólida café) muestra un punto de fusión a 160°C, con ligeras curvaturas posteriores, que de acuerdo a García (2011), representan relajaciones de la estructura de los productos, mientras que la curva de harina a 50°C (línea punteada café) presentó un pico de fusión a 142°C.

Se observa que a temperaturas de 0°C a 140°C la harina de mezquite el material es térmicamente estable, al no observarse ninguna transición. Con respecto a las curvas de flujo de calor reversible (azules) a 50 y 60°C, presentaron transiciones vítreas (tg) en rangos de temperatura de 27 a 34°C; y para la curva de 60°C (línea

sólida azul) de 103 a 122°C, así como una cristalización a 160°C. Por otra parte, en la curva de 50°C (línea punteada azul) se identificó una relajación de la curva entre 114-128°C, la cual se interpretó como la evaporación del agua presente en la harina, seguida de picos de cristalización, atribuidas a una mayor movilidad de cadenas poliméricas tales como los sacáridos, que presentan una menor estabilidad (Gutiérrez *et al*, 2014).

### Curvas de DSC de harinas de mezquite a diferentes actividades de agua

Características y Condiciones:

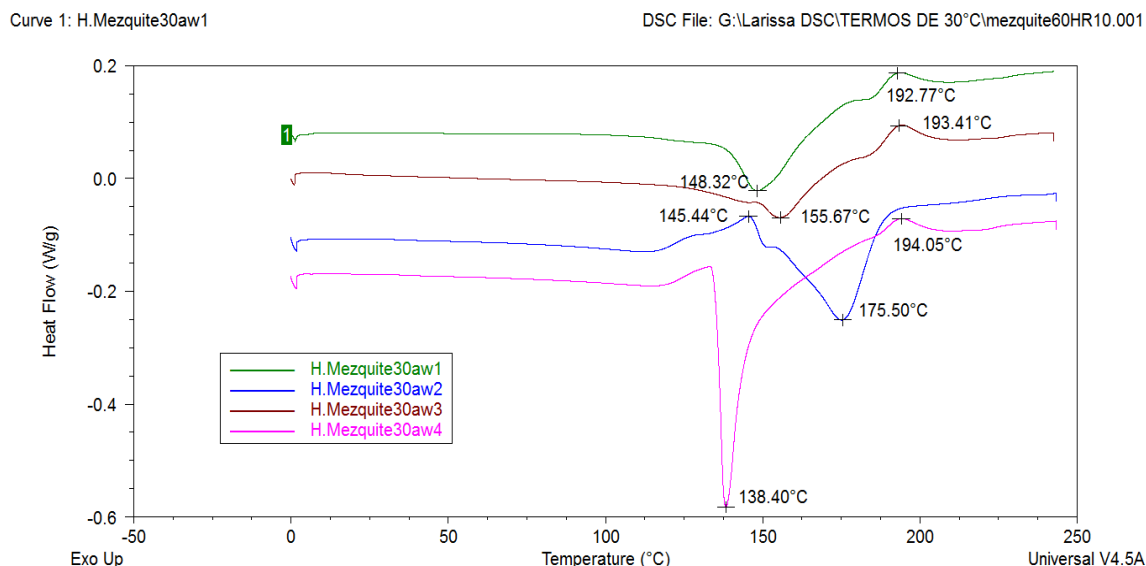
Muestras: Harinas de mezquite de Isotermas de 30°C

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 250°C

Temperatura Inicial: 0°C

$a_w1 = 0.074$ ;  $a_w2 = 0.324$ ;  $a_w3 = 0.514$ ;  $a_w4 = 0.67$



**Figura 38.** Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) con diferentes actividades de agua a 30°C.

La Figura 38 presenta una estabilidad de las muestras desde 0°C hasta 120°C, con largos picos endotérmicos (fusión) que representaron un mayor flujo de calor conforme incrementó la  $a_w$  de la muestra; en un rango de temperatura de 138.40°C a 175.50°C aprox. El punto de fusión más grande lo presenta la muestra de harina con  $a_w$  de 0.67 (curva magenta) a 138.40°C y un flujo de calor de -0.4115 W/g, mientras que la curva café presentó una fusión menor con un flujo de calor de apenas -0.0692W/g. Así también, se observa que conforme aumenta la actividad de agua de las muestras de harinas, las transiciones endotérmicas se observan a una mayor temperatura, siendo la curva azul la que presenta un mayor punto de fusión (175.50°C); sin embargo, la curva magenta con la  $a_w$  más alta se mostró a una

temperatura menor y con un mayor flujo de calor, esto posiblemente a una mayor evaporación del agua. Posterior a los puntos de fusión se observaron inflexiones de las curvas, con leves formaciones de picos exotérmicos a partir de los 190°C, lo cual se le atribuyó a un endurecimiento de los azúcares presentes en la harina.

Características y Condiciones:

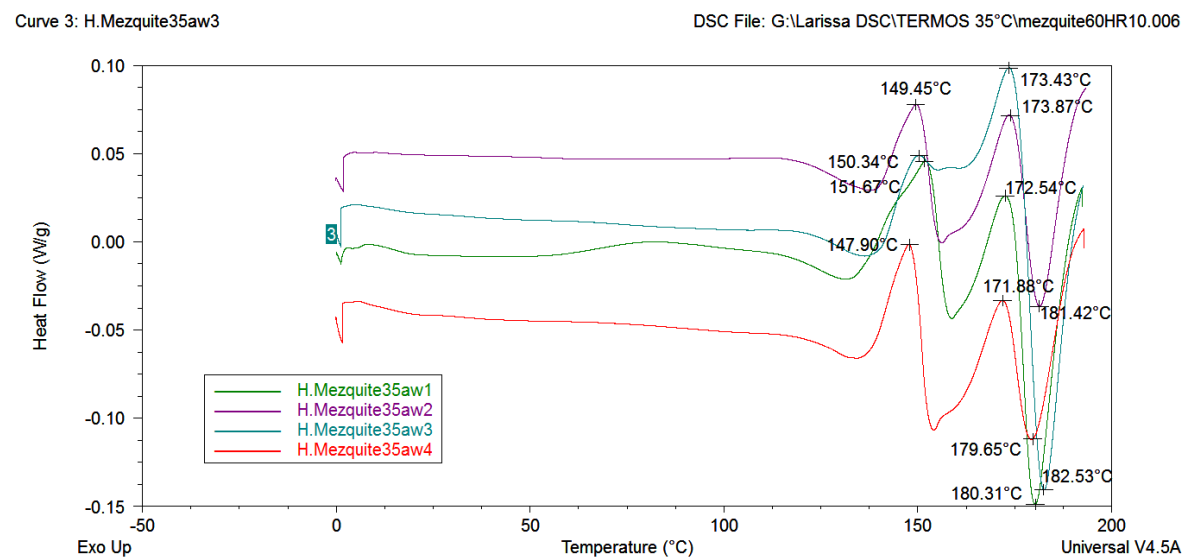
Muestras: Harinas de mezquite de Isotermas de 35°C

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 200°C

Temperatura Inicial: 0°C

$a_w1 = 0.076$ ;  $a_w2 = 0.318$ ;  $a_w3 = 0.515$ ;  $a_w4 = 0.67$



**Figura 39.** Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) con diferentes actividades de agua a 35°C.

En la Figura 39 se aprecia un primer evento entre los 50 °C a 130°C, asociado a una relajación molecular de las harinas (antes de las transiciones de fusión y cristalización). Se observan picos exotérmicos acentuados a temperaturas cercanas a los 150°C, seguidos de puntos de fusión. Estas transiciones pueden atribuirse a la evaporación del agua ligada presente en la estructura (pérdida de agua), y a la fusión de la fase cristalina de polímeros de acuerdo a investigaciones por Bertranm y Dale (1986) y Caicedo *et al*, (2002) en membranas de glucosa. Las harinas de mezquite al estar sometidas a mayor temperatura, tienden a concentrar los azúcares presentes en su composición (Badui *et al*, 2006), siendo la posible causa de la aparición de cristalizaciones y recristalizaciones continuas.



Características y Condiciones:

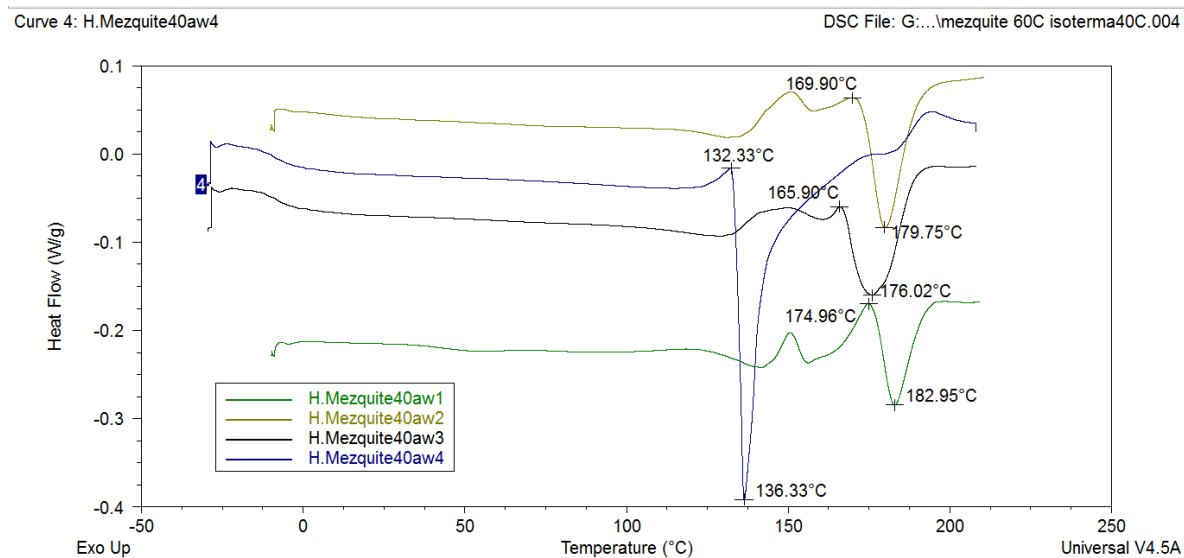
Muestras: Harinas de mezquite de Isotermas de 40°C

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 220°C

Temperatura inicial: -10 a -30°C

$a_w1 = 0.063$ ;  $a_w2 = 0.316$ ;  $a_w3 = 0.484$ ;  $a_w4 = 0.66$



**Figura 40.** Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) con diferentes actividades de agua a 40°C.

En la Figura 40 se muestra que las tres primeras curvas del termograma (curvas verde, dorada y negra) presentan picos exotérmicos, debido a la presencia de cristalizaciones y recristalizaciones de azúcares simples, con una fusión máxima de 176°C. La parte amorfa del alimento presenta un cambio en los valores de capacidad calorífica, asociado a una posible movilidad molecular por presencia de agua, que puede repercutir en las características físicas y sensoriales de la muestra (Espinosa y Sánchez, 2010). No obstante, la curva azul con  $a_w$  de 0.66 presentó un inmediato punto de fusión máximo con un alto flujo de calor a 136.33°C, seguido de una cristalización en un rango de 180-190 °C por presencia de sacarosa.



Características y Condiciones:

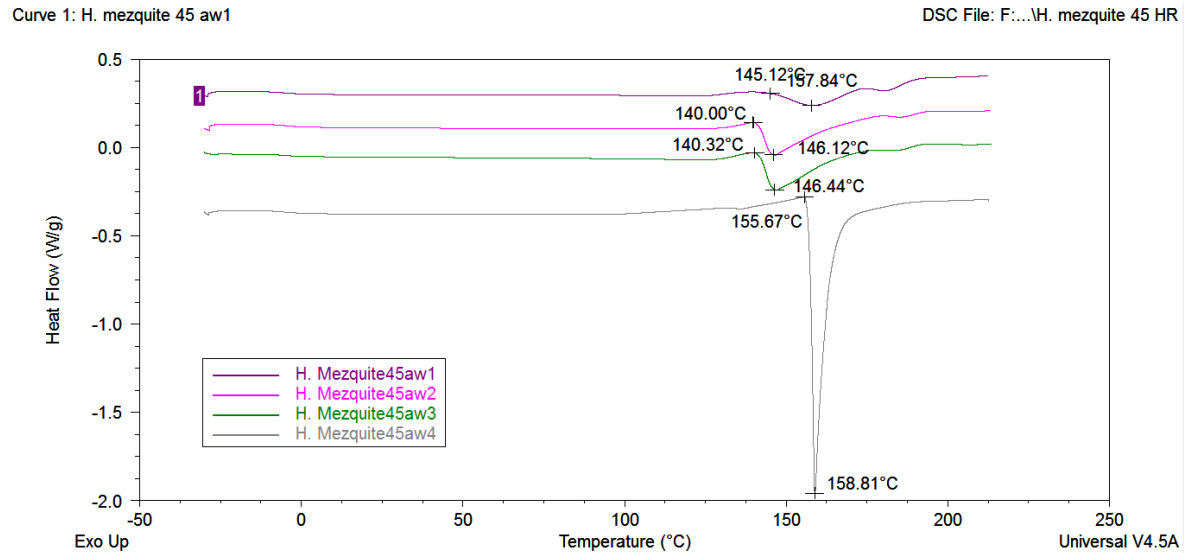
Muestras: Harinas de mezquite de Isotermas de 45°C

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 220°C

Temperatura Inicial: -30°C

$a_w1 = 0.063$ ;  $a_w2 = 0.318$ ;  $a_w3 = 0.485$ ;  $a_w4 = 0.661$



**Figura 41.** Curvas de flujo de calor vs temperatura de harinas de mezquite (*Prosopis laevigata*) con diferentes actividades de agua a 45°C.

En la Figura 41 se puede observar que las harinas de mezquite con las cuatro  $a_w$  designadas presentaron una estabilidad en un rango de 0 a 140 °C. La primera transición de fase que se observa es un punto de fusión a 143°C aprox. para harinas con actividades de agua de 0.31 y 0.48, la última presenta una transición endotérmica a 146°C. El flujo de calor de las transiciones endotérmicas aumento conforme incrementaba la  $a_w$  de las harinas, corroborando un efecto de la actividad de agua en la modificación de la estructura de las harinas, así como su estabilidad térmica. Una segunda transición se presentó en las harinas con actividades de 0.06 a 0.48 que indica una recristalización de azúcares tales como la L-arabinosa y sacarosa que se encuentran en mayor cantidad.

### 4.8.3. Termogramas de almidones, proteínas de mezquite y sacáridos

En las Figuras 42 a 45 se muestran los termogramas de diferentes componentes: almidones hidratados y sin hidratar, azúcares simples, proteínas de origen animal y proteínas extraídas de harina de mezquite.

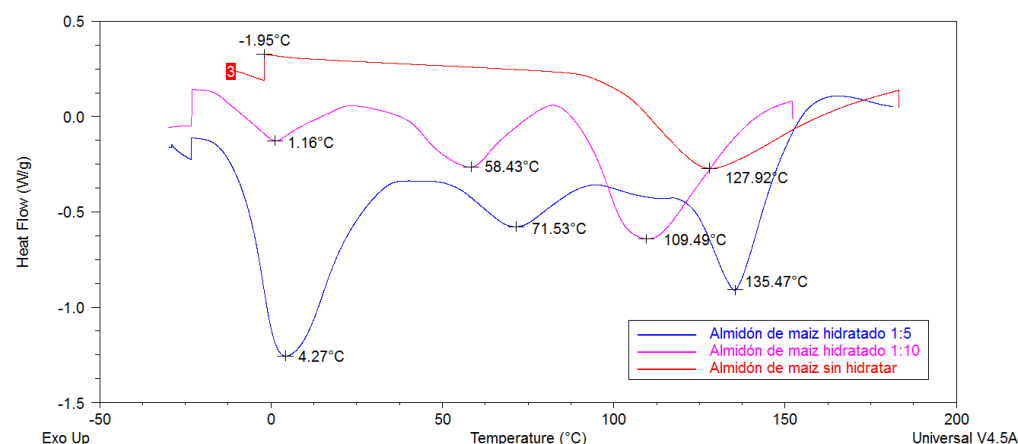
Características y Condiciones:

Muestras: Almidones de maíz hidratados 1:5 y 1:10, y almidón de maíz no hidratado

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 10°C/min hasta 190°C

Temperatura Inicial: -10°C a -30°C



**Figura 42.** Comparación de curvas de DSC de almidones de maíz no hidratados e hidratados en relaciones de 1:5 y 1:10.

La primera transición que se observa en la Figura 42 es un punto de fusión en las curvas de almidón de maíz hidratados en las dos proporciones (curva azul y magenta), con valores máximos de 1.16°C a 4.27°C (temperaturas cercanas a los 0°C que indican una transición térmica de los almidones). En las curvas de almidones hidratados (azul y magenta) se presenta una retrogradación (cristalización de amilopectina), que se visualiza como una pequeña meseta entre las temperaturas de 25-55°C.

En estas mismas curvas se pueden apreciar endotermas entre 50-80°C que hacen referencia a la gelatinización de almidones, seguidos de picos endotérmicos y recrystalizaciones a partir de 109°C para el almidón de maíz hidratado en una relación 1:10, y 135°C para almidón hidratado en una relación de 1:5; dichas fusiones y recrystalizaciones son del complejo de amilosa (Moorthy *et al*, 2006). En cuanto a la curva de almidón de maíz sin hidratar, solo presentó un punto de fusión

a 127.92°C, sin presentar cristalizaciones, esto debido a un inexistente efecto de humedad de la muestra.

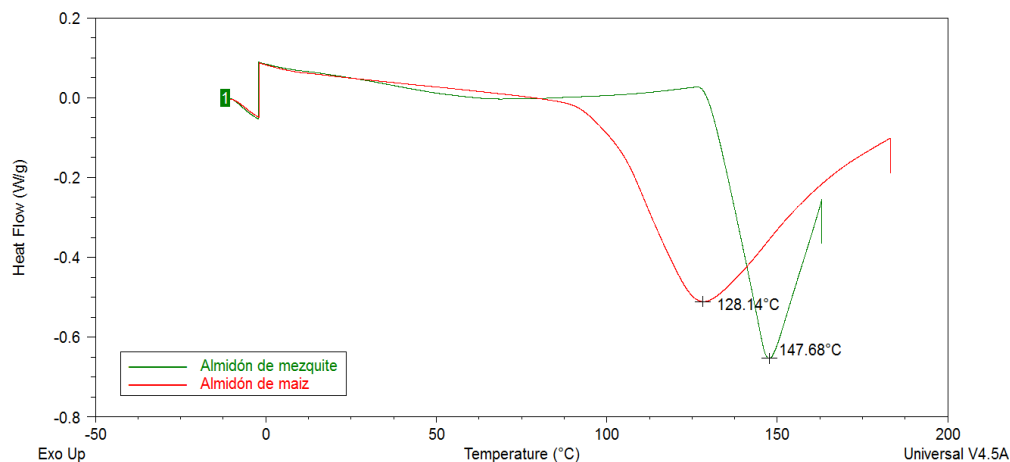
Características y Condiciones:

Muestras: Almidones de maíz y mezquite

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 10°C/min hasta 190°C

Temperatura Inicial: -10°C



**Figura 43.** Comparación de curvas de DSC de almidones de maíz y almidones extraídos de mezquite.

En la Figura 43 se observa para ambas curvas (almidón de maíz y mezquite) una estabilidad en un rango de 0°C a 125°C, siguiendo con un pico endotérmico, para la muestra de maíz a 128°C y de mezquite a 148°C, los cuales se pueden asociar a fusiones de amilosa (Moorthy *et al*, 2006). El punto de fusión de la muestra de almidón de mezquite presento una mayor amplitud en el flujo de calor debido a una evaporación del agua presente en la muestra.

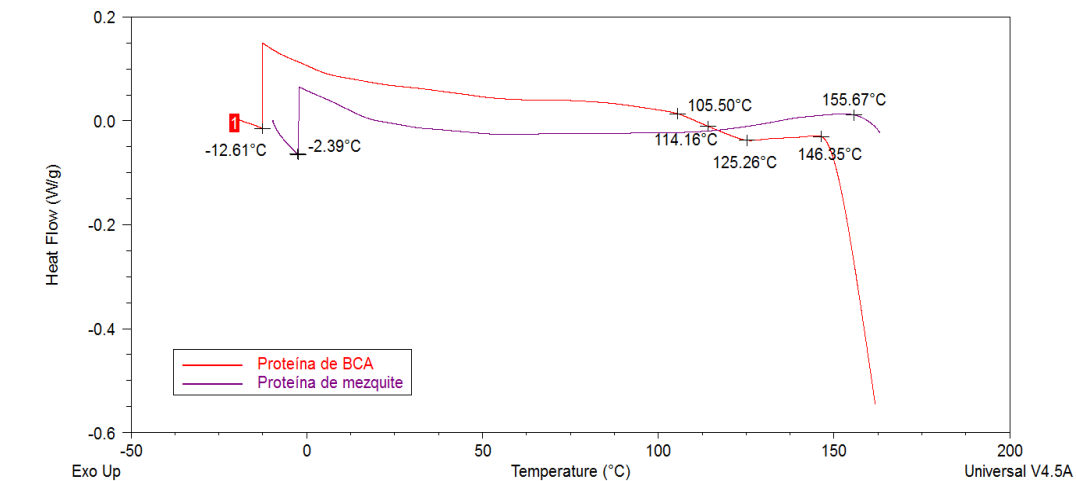
Características y Condiciones:

Muestras: Proteínas de BCA y Mezquite

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 10°C/min hasta 200°C

Temperatura inicial: -10°C A -20°C



**Figura 44.** Comparación de curvas de DSC de proteínas de Albumina de Suero Bovino (BCA) y proteínas extraídas de mezquite.

En la Figura 44 se muestran las curvas de proteínas de albumina de suero bovino (BCA) y extracción de proteína de harina de mezquite. En la curva de BCA se puede apreciar una transición vítrea ( $T_g$ ) en los rangos de temperatura de 105°C a 125°C, con una  $T_g$  de 114°C; dicha transición vítrea es característica de esta proteína concentrada (Chatterjee *et al*, 2005). Posteriormente, se observa la degradación de la muestra de ACB a partir de los 146.35°C. En cuanto a la curva de proteína de mezquite, no se observan transiciones vítreas, solo se observa una larga endoterma con un bajo flujo de calor en un rango de 0°C hasta 156°C, debido a una relajación de la estructura de la muestra. Posteriormente, se observó la degradación de la muestra.

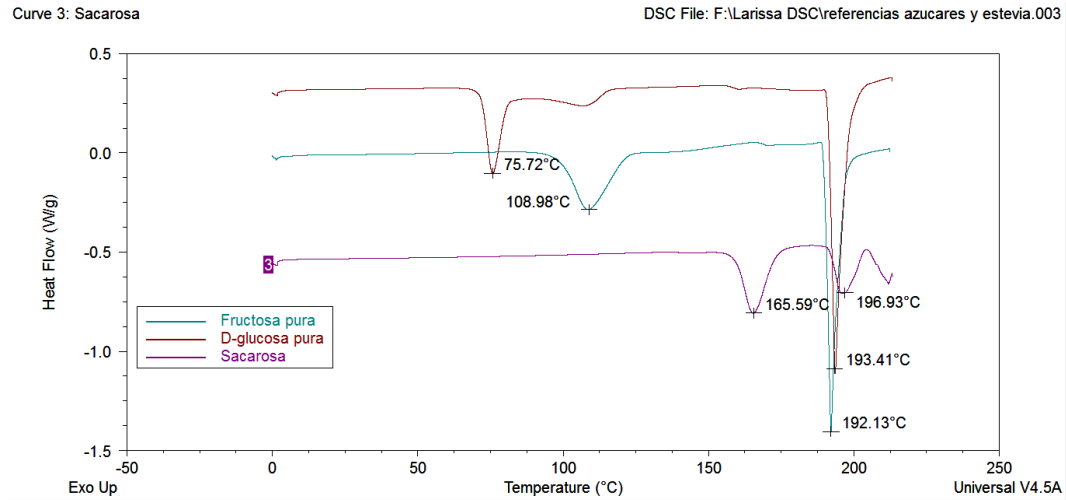
Características y Condiciones:

Muestras: Fructosa, D-Glucosa y Sacarosa

Método: Convencional MDSC. Modulado 5°C cada 120 segundos

Rampa: 2°C/min hasta 220°C

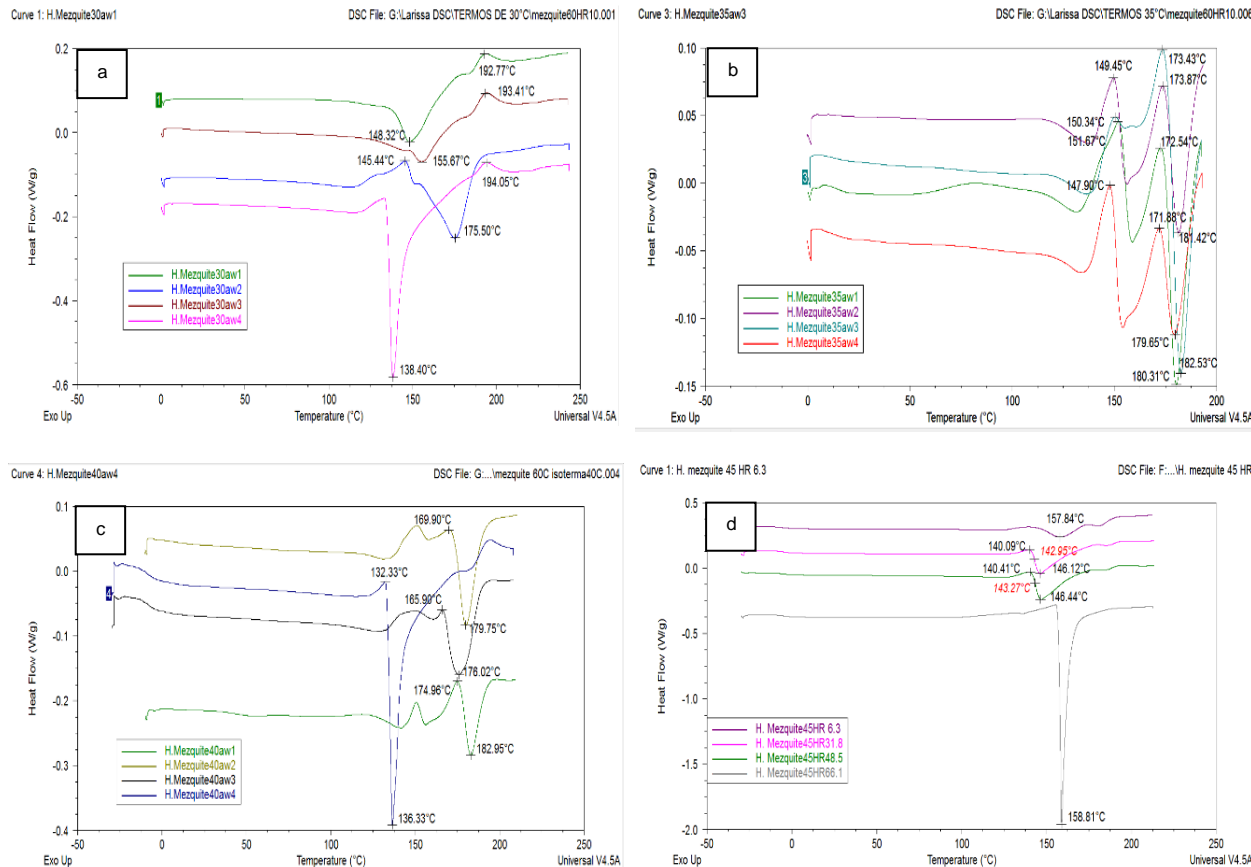
Temperatura inicial: 0°C



**Figura 45.** Comparación de curvas de DSC de azúcares de fructosa, D-glucosa y sacarosa.

En la Figura 45 se identificó un punto de fusión característico de la sacarosa a 165°C, mientras que los monosacáridos como glucosa y fructosa presentaron un punto de fusión entre 75-109 °C. Todos los azúcares mostraron deshidrataciones entre 192-197°C, sin embargo, no se identificó cristalizaciones, ni degradación térmica.

## 4.8.4 Comparación de termogramas de harinas de mezquite



**Figura 46.** Comparación de termogramas de harinas de mezquite a 30,35,40 y 45°C con diferentes actividades de agua.

En la Figura 46 se observa una estabilidad entre 0-100°C para las 4 temperaturas. Los termogramas de harina de mezquite presentaron importantes endotermias en un rango de 130-180 °C, siendo asociados a una fusión de los azúcares simples presentes en la harina (Cedeño y Cornejo, 2010). Las curvas con mayor actividad de agua muestran endotermias con un flujo de calor mayor y una temperatura de fusión menor que las curvas con actividades bajas. Estas transiciones endotérmicas se presentaron debido a una mayor cantidad de agua existente en la muestra de harina, lo que provoca la movilidad de las moléculas y una disminución de la transición (Recondo *et al*, 2006).

De acuerdo al comportamiento térmico de los azúcares presentados anteriormente (Figura 45), estos componentes se relacionaron con las transiciones endotérmicas identificadas en los termogramas de harinas de mezquite. De acuerdo a Barba de la Rosa *et al*, (2006), los azúcares tales como glucosa, maltosa, L-arabinosa y sacarosa, se encuentran en gran proporción en las vainas de mezquite, por lo cual las transiciones para este alimento pueden relacionarse a un sistema binario de agua-carbohidrato (Gutiérrez *et al*, 2014). También se observa que los termogramas

(a, b y c) presentan relajaciones moleculares de los componentes presentes en la harina (antes de las transiciones endotérmicas y exotérmicas) entre 50-130 °C, siendo mayor para lo reportado por Patist y Zoerb en el 2004 para el disacárido Trehalosa. Sin embargo, de acuerdo a Richards *et al*, (2002), si las temperaturas de relajación aumentan esto es debido a una fuerte solubilidad e interacción con el agua. El apelmazamiento y la pegajosidad de los polvos amorfos altos en sacáridos tienden a ocurrir cuando estos se someten a temperaturas muy altas, siendo este el primer cambio de fase que podría definir la temperatura crítica en el polvo (Espinosa y Urias, 2012).

En el termograma d (45°C) se observa una mayor estabilidad de la muestra en un amplio rango de temperatura, a diferencia de los termogramas b y c. De los cuatro termogramas, cada uno presentó una similitud en la aparición de sus transiciones, no obstante, el termograma b (35°C) mostró un comportamiento inestable en las variaciones de las transiciones, posiblemente a una mayor cantidad de moléculas de agua presentes en la muestra y a su movilidad. Este comportamiento térmico está relacionado al apelmazamiento y colapso estructural (Martínez *et al*, 2000).

#### 4.8.5 Temperaturas de transiciones de fase y variaciones de entalpia

En la Tabla 25 a 28 se muestran los valores de las variaciones de entalpia de las dos transiciones de fase observadas, las cuales fueron incrementando y disminuyendo a medida que la actividad de agua fue mayor, esto posiblemente debido a una heterogeneidad de la muestra y a la variedad de los componentes de la harina de mezquite. Ese comportamiento térmico fue similar para Alves Da Silva *et al*, (2001) en harina de algarrobo. Debido a que las entalpias de las transiciones de fusión y cristalización de cada termograma no fueron mayores que  $100 \text{ J/mol}^{-1}$ , estos cambios de fase no fueron asociados a la vaporización del agua (Geankoplis, 1998); siendo la causa probable un cambio de fase de un estado sólido a líquido de los sacáridos presentes en la harina, no obstante, la última muestra de harina a 45°C con mayor actividad de agua, presentó una entalpia mayor a  $200 \text{ J/mol}^{-1}$ , la cual correspondió a una vaporización del agua de la muestra.

**Tabla 25.** Temperaturas de transición de fase y variaciones de entalpía para el termograma (a) de harinas de mezquite.

Temperatura constante de almacenamiento de las harinas (°C)	$a_w$ de la harina de mezquite	Temperatura de fusión (°C)	$\Delta H$ ( $\text{J/mol}^{-1}$ )	Temperatura de cristalización y recristalización (°C)	$\Delta H$ ( $\text{J/mol}^{-1}$ )
30	7.4	149.04	60.85	192.77**	9.88
	32.4	175.16	131.8	145.44*	14.19
	51.4	155.81	55.98	193.41**	11.86
	67.9	138.33	167.6	194.05**	7.69

$\Delta H$  ( $\text{J/mol}^{-1}$ ): Variación de entalpia de fase, Cristalización: \*, Recristalización:\*

**Tabla 26.** Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (b) de harinas de mezquite.

Temperatura constante de almacenamiento de las harinas (°C)	a <sub>w</sub> de la harina de mezquite (%)	Temperatura de cristalización (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )	Temperatura de fusión (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )
35	7.6	152.08	32.59	180.28	46.66
	31.8	149.78	17.67	181.5	30.88
	51.5	150.32	0.88	182.41	55.45
	67	147.88	25	179.7	28.03

ΔH (J/mol<sup>-1</sup>): Variación de entalpía de fase

**Tabla 27.** Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (c) de harinas de mezquite.

Temperatura constante de almacenamiento de las harinas (°C)	a <sub>w</sub> de la harina de mezquite (%)	Temperatura de fusión (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )	Temperatura de cristalización y recristalización (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )
40	6.3	182.97	32.36	150.24*	6.76
	31.6	180.06	47.56	150.01*	9.98
	48.4	176.27	48.88	144.80*	9.79
	66.1	136.43	106.1	192.87**	6.73

ΔH (J/mol<sup>-1</sup>): Variación de entalpía de fase, Cristalización: \*, Recristalización: \*\*

**Tabla 28.** Temperaturas de transición de fase con sus variaciones de entalpía para el termograma (d) de harinas de mezquite.

Temperatura constante de almacenamiento de las harinas (°C)	a <sub>w</sub> de la harina de mezquite (%)	Temperatura de fusión (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )	Temperatura de cristalización (°C)	ΔH (J/mol <sup>-1</sup> )
45	6.3	158.46	42.78	143.35	20.86
	31.8	146.56	91.16	140.00	25.38
	48.5	146.95	99.40	140.76	38.04
	66.1	158.81	276	156.79	206.4

ΔH (J/mol<sup>-1</sup>): Variación de entalpía de fase



## 4.9 Características reológicas de masas de harina de trigo y mezquite: prueba adicional

La Tabla 29 presenta los valores de las determinaciones alveográficas de masas de harina de trigo con diferentes porcentajes de harina de mezquite añadida. Los valores de extensibilidad (L) de masas disminuyeron a medida que el % de adición de harina de mezquite fue mayor, presentando el valor más alto (81 mm) con un 5% de harina de mezquite añadida. Por otro lado, la tenacidad (P) decreció con el incremento de la harina de mezquite de 10 a 15%. La reducción de los valores de tenacidad y extensibilidad son debido a un posible debilitamiento de la proteína glutenina y gliadina presentes en la harina de trigo, y a una menor absorción de agua por un alto contenido de fibra en la harina de mezquite. No obstante, el índice de elasticidad aumentó conforme se agregó mayor cantidad de harina de mezquite. Estos resultados fueron parecidos a los reportados por Pereira de Gusmao *et al*, (2016) y Bigne *et al*, (2016).

Los resultados de fuerza de panificación indicaron que, a mayor adición de harina de mezquite con harina de trigo, la masa puede presentar una menor capacidad de retención del gas que se genera durante la fermentación y elevación del pan (Henao y Aristizábal, 2009). La disminución de los valores de fuerza de panificación se debe al alto contenido de fibra presente en la harina, siendo este componente favorable para el tiempo de desarrollo de la masa y la resistencia al amasado; pero con la desventaja de disminuir la capacidad de retención del gas y el volumen del pan. El alto contenido de azúcares de la harina puede mejorar la fermentación y por ende la inflación del pan, sin embargo, al menor sobre-amasado, la masa tiende a la deformación y menor consistencia (Henao y Aristizábal, 2009). Por lo tanto, la proporción de harina de trigo (95%) y mezquite (5%), es ideal para la formación de una masa que puede aplicarse a productos de panificación y repostería, con un sabor característico y alto valor nutricional.

**Tabla 29.** Características reológicas de masas de harina de trigo con harina de mezquite.

Proporción de harina de trigo y harina de mezquite	Tenacidad (P) (mm)		Presión de ruptura (mm)		Extensibilidad (L) (mm)		Índice de inflación (G) (%)		Índice de Elasticidad (IE) (%)		Fuerza de panificación (W) ( $J \times 10^4$ )	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
M1 (0% H. mezquite)	83	6.04	6	1.87	74.6	7.89	19.2	1.0	14.62	4.95	4.20	3.29
M2 (5% H. mezquite)	35.4	2.60	4.6	0.89	81	6.24	20.0	0.8	26.04	5.23	2.63	2.54
M3 (10% H. mezquite)	22.4	5.07	6.4	3.20	50.4	32.91	14.0	8.2	64.06	42.03	2.74	0.83
M4 (15% H. mezquite)	18.4	3.13	5.6	0.89	19	5.33	9.6	1.3	63.04	17.61	2.67	2.02
M5 (20% H. mezquite)	No se pudo realizar la panificación a esta concentración de harina de mezquite											

## Capítulo 5. Conclusiones

El procesamiento de harinas de mezquite es de alta dificultad, debido a la complejidad en la estructura de la vaina de mezquite para su secado y molienda, así como el alto contenido de azúcares que le confieren una alta higroscopicidad.

Las etapas de secado y molienda de las vainas, son importantes para la obtención y selección de la harina. La harina obtenida mediante un secado a 60°C, molienda en molino pulverizador para leguminosas y tamizaje en malla N°60 presenta las mejores características fisicoquímicas en comparación con la harina obtenida por licuadora. Las condiciones antes mencionadas son necesarias para el correcto procesamiento de harinas de mezquite y el cumplimiento de los parámetros establecidos en las normas oficiales de harinas de cereales y leguminosas.

La harina de mezquite obtenida por molino pulverizador tiene la ventaja de tener un alto valor nutricional con un mayor contenido de azúcares, proteínas y fibra, a comparación de las harinas obtenidas por licuadora, por lo cual se le consideró una harina integral con potencial para ser consumida por personas con diferentes necesidades alimenticias, y con posibles aplicaciones tales como: endulzante natural, para la elaboración de pastas, galletas, botanas, productos para empanizar, así como suplemento alimenticio.

De acuerdo al contenido de proteína, fibra y cenizas de la harina de mezquite obtenida por molino pulverizador, se cumplió con la normatividad para considerarse una harina de Grado II y III (NOM-007, 1982) para su aplicación en productos de repostería como galletas, masas que no requieran alta consistencia y volumen, así como para la elaboración de pastas y tortillas.

La composición nutricional entre la harina molida en licuadora y harina molida en molino pulverizador presentaron una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza y un alfa de 0.05.

El análisis de granulometría de las harinas reveló que la molienda por molino pulverizador mejoro el tamaño y forma de las partículas, observándose una mayor homogeneidad en la harina, que aquellas obtenidas por molienda en licuadora; por lo cual se cumplió con las especificaciones de tamaño de partícula para considerarse una harina. Otra ventaja de las harinas obtenidas por molino pulverizador fue que presento una buena fluidez y baja cohesividad.

En cuanto al comportamiento de adsorción de las harinas de mezquite, las isotermas revelaron una forma sigmoideal tipo II, la cual es característica de polvos de alimentos con contenidos altos de azúcar. Se concluyó que, a mayor temperatura, el contenido de humedad es menor, y que a medida que la actividad de agua aumenta, el contenido de humedad se eleva de forma exponencial. El

máximo valor de humedad indicado para el almacenamiento de harinas es de 14% de acuerdo a la NMX-007-1982, por tanto, el valor de humedad relativa (HR%) para su almacenamiento debe ser menor al 30% y a una temperatura máxima de 45°C.

Los termogramas por calorimetría mostraron que las harinas son muy estables térmicamente de 0-130°C y que las fusiones identificadas son debidas principalmente a las variaciones en el contenido de humedad y el contenido de azúcares. Someter la harina de mezquite a una cocción que sobrepase esta temperatura puede originar la fusión y cristalización de los azúcares, los cuales pueden modificar la estructura de los productos horneados con la harina de mezquite. Por otra parte, a causa de la escasa presencia de almidón en las harinas de mezquite, no se observaron las temperaturas de gelatinización y transiciones vítreas.

Los parámetros reológicos indicaron que la harina de mezquite es adecuada para la elaboración de productos de panificación y repostería si se utiliza en una proporción del 5-10%, combinada con harina de trigo. Con un porcentaje de harina de mezquite mayor al 20%, no es posible utilizar la harina para la formación de masas.

El contenido nutricional de los polvos revela propiedades importantes para la harina de mezquite. Las harinas revelan un uso potencial en la industria de los alimentos.

## Capítulo 6. Bibliografía

Ade, A. R., Ajav, E. A., Raji, A. O., Adetayo, S. A., & Arowora, K. A. (2016). Moisture sorption isotherms of Mesquite seed (*Prosopis africana*). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3), 273-281.

Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A.M., & Magee, T.R.A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: mathematical description of experimental data. *J. Food Eng.* 61, 297–307.

Alves da Silva, S., Gouveia Souza A., Prasad S. & Oliveira Cavaleiro J.M. (2001). Calorimetry and thermogravimetric study of algaroba [*Prosopis juliflora* (SW) D. C.]. *Quím. Nova*, 24: 4, pp.460-464.

Allen, T. (1981). *Particle Size Measurement*. Chapman & Hall, Londres, 3<sup>o</sup> Edition., 454 p.

Anderson, D. M. W., & Farquhar, J. G. K. (1982). Gum exudates from the genus *Prosopis*. *International Tree Crops Journal*. 2(1), 15-24.

AOAC. (2005). Official Methods 925.10 (32.1.03) – Solids (total) and Moisture in Flour – Air Oven Methods: Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC. (1994). Official Method 991.43- Total, Soluble, and Insoluble Dietary Fibre in Foods. Methods: Official Methods of Analysis of AOAC International.

AOAC. (2000) Official methods of analysis (by Dr. William Horwitz). Methods: N° 950.48, 969.24, 923.03 and 923.09. 17th Ed. Gaithersburg, MD, USA.

Arriaga, M., Cervantes, G., & Vargas Mena, A. (1994). Manual de reforestación con especies nativas: colecta y preservación de semillas, propagación y manejo de plantas. SEDESOL.

ASTM International. (2000). Standard test method for measuring the angle of repose of free-flowing mold powders. ASTM C 1444-00. Annual book of ASTM standards.

ASTM. American Society for Testing and Materials. Standard test method for melting and crystallization Temperatures by thermal analysis. Thermal analysis standards.

Austin, L.G. & Trass O. (1996). *Handbook of Powder Science and Technology: Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment*. Ed. Fayed, M. E., Otten, L., Chapman & Hall, N.Y.

Ayala Aponte, A. (2011). Estimación de las isoterms de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 9 (1): 88-96.

Badui S. (2006). *Química de los alimentos*. 4<sup>o</sup> ed. Ed. Pearson Educación: México D.F. 716 p.

Badui D., S., Valdés M., S. E., & Cejudo G., H. (2006). *Química de los alimentos* (No. TX545. B3 2006).

Barbosa Cánovas, G. V., Ortega Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2005). Food powders: physical properties, processing, and functionality. *Springer Science and Business Media*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.

Barba De La Rosa, A. P., Frías Hernández, J. T., Olalde Portugal, V., & González Castañeda, J. (2006). Processing, nutritional evaluation, and utilization of whole mesquite flour (*Prosopis laevigata*). *Journal of Food Science*, 71(4), 315-320.

Barbosa Cánovas, G. V., Fontana Jr, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2008). Water activity in foods: fundamentals and applications. *John Wiley and Sons*.

Bhadeshia H. K. D. H. (2002). Differential Scanning Calorimetry. *Materials Science and Metallurgy*. University of Cambridge, 1-9.

Bhandari Bhesh, Bansal Nidhi, Zhang Min & Schuck Pierre. (2013). *Handbook of Food Powders*. Woodhead Publishing Limited.

Bhandari, B. R. & Hartel, R.W. (2005). Phase transitions during food powder production and powder stability. In Charles Onwulata (Ed.), *Encapsulated and Powdered Foods* (pp. 261-292) New York: Taylor & Francis.

Bell, L. N. & Labuza, T. P. (2000). Moisture sorption: practical aspects of isotherm measurement and use. *American Association of Cereal Chemists*.

Bertran, M. S. & Dale, B. E. (1986). Determination of cellulose accessibility by differential scanning calorimetry. *Journal of applied polymer science*, 32(3), 4241-4253.

Bigne, F., Puppo, M. C., & Ferrero, C. (2016). Rheological and microstructure characterization of composite dough with wheat and mesquite (*Prosopis* spp) flours. *International Journal of Food Properties*, 19(2), 243-256.

Biliaderis C.G., Maurice T. J, & Vose J.R. (1980). Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. *Journal of Food Science*, 45, 1669–1680.

Bravo, L. & Saura-Calixto, F. (1994). Composition and potential uses of mesquite pods (*Prosopis pallida* L): Comparison with carob pods (*Ceratonia siliqua* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 65(3), 303-306.

Bronlund, J. & Paterson, T. (2004). Moisture sorption isotherms for crystalline, amorphous and predominantly crystalline lactose powders. *International Dairy Journal*, 14, 247-254.

Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layer. *Journal of American Chemists Society*, 60, 309–319.

Burkart, A. (1937). Estudios morfológicos y etológicos en el género *Prosopis*. *Darwiniana*, 3(1), 27-48.

Burtis, Ashwood & Bruns. (2005). *Tietz Textbook of Clinical Chemistry and Molecular Diagnosis*. Elsevier Saunders, 2293.

Capparelli A. & Prates L. (2015). Explotación de frutos de algarrobo (*Prosopis* spp.) por grupos cazadores recolectores del noreste de Patagonia. *Rev. Antropol Chil.* Vol. 47

Caicedo L., De França F., & De Almeida L. (2002). “Produção de Celulose Bacteriana em Reatores de Tambor Rotatório”. Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ciencias. Escola de Química. Río de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pp.311-319

Cedeño M. & Cornejo F. (2010). Determinación de la temperatura vítrea de transición en caramelos duros. Escuela Superior Politécnica del Litoral: Guayaquil, Ecuador.

Celeghein A. G. & Rubiolo A.C. (2002). Variación de la transición vítrea de sistemas azucarados con la composición y las condiciones de almacenamiento. *Rev FABICIB*, 6, 139-145.

Cerón Ortiz, A. N., Vidal Gómez, A. Y., & Ángeles Monroy, M. A. (2015). Impacto del estado de madurez de la vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) en su composición fisicoquímica posterior a su transformación en polvo. *Revista Congreso Nacional de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable*. 1, 1-7.

Chang B. S, Park K.H, & Lund D.B. (1988). Thermal inactivation kinetics of horseradish peroxidase. *Journal of Food Science*, 53, 920–923.

Chatterjee K, Shalaev EY, & Suryanarayanan R. (2005). Partially crystalline systems in lyophilization: II. Withstanding collapse at high primary drying temperatures and impact on protein activity recovery. *J Pharm Sci.*;94(4):809–820.

Chen, X.D. (1994). Mathematical analysis of powder discharge through longitudinal slits in a slowly rotating drum: objective measurements of powder flowability. *Powder Technol.* 21: 421–437.

Chirife, J. & Iglesias, H.A. (2001). Water Sorption Isotherms of Foods and Foodstuffs: Bet or Gab Parameters? *Journal of Food Engineering*.1: 19 – 31.

Código Alimentario Argentino. Capítulo XIX: Harinas, Concentrados, Aislados y Derivados Proteínicos. Actualizado al 9/2010. Pp. 1407 al 1412.

CONAZA. (1994). Mezquite, *Prosopis* sp. Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. México: Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Instituto de Ecología.

CONAZA E INE. (2000). El mezquite *Prosopis* spp. Centro de investigación regional del noroeste campo experimental todos santos. Pp. 52.

Corona Castuera, F., Gómez Lorence, F., & Gloria, E. (2014). Análisis químico proximal de la vaina del mezquite (*Prosopis glandulosa* var. *Torreyana*) en arboles podados y no podados, en diferentes etapas de fructificación. *Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I.P.N.*

Correia Calpe E., Igual M., García E., Moraga G., & Martínez N. (2011). Efecto de la adición de solutos en propiedades físico-químicas relacionadas con la calidad y estabilidad de

Pomelo liofilizado en polvo. Grupo de Investigación e innovación alimentaria (CUINA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia.

Corzo Ríos, L., Chel Guerrero, L., & Betancur Ancona, D. (2000). Extracción de las fracciones de almidón y proteína del grano de la leguminosa *Mucuna pruriens*. *Tecnología, Ciencia, Educación*. 15: 1, pp. 37-41.

Cruz, G. (1999) Production and characterization of Prosopis seed galactomannan. *PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology*. 113.

Cuevas Diarte M. A., Bayés García L. & Calvet T. (2014). Cristales en los alimentos. Unión Internacional de Cristalografía. Universidad de Barcelona.

Davies, R. (1984). Particle size measurement: experimental techniques. Handbook of Powder Science and Technology. New York.

Donovan J.W & Mapes C.J. (1976). A differential scanning calorimetric study of conversion of ovalbumin to S-ovalbumin in eggs. *J Sci Food Agric*, 27, 197–204.

Donovan J.W, Mapes C.J, Davis J.G, & Garibaldi J.A. (1975). A differential scanning calorimetric study of the stability of egg white to heat denaturation. *J Sci Food Agric* 26, 73–83.

Earle, R.L. (1988). Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia. España 2º Edición

Egerton, R. F. (2005). Physical principles of electron microscopy: an introduction to TEM, SEM, and AEM. *Springer*, P.p 202.

Eim, V.S., Rosselló, C., Femenia, A., & Simal, S. (2011). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of carrot. *International Journal of Food Engineering*, 7, p. 1-18.

Erbas, M., Ertugay, M. F. & Certel, M. (2005). Moisture adsorption behaviour of semolina and farina". *Journal of Food Engineering*, 69 (2): 191 - 198.

Escobar, B., Estévez, A. M., Fuentes, C., & Venegas, D. (2009). Uso de harina de cotiledón de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz) como fuente de proteína y fibra dietética en la elaboración de galletas y hojuelas fritas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(2), 191.

Espinosa Andrews, H., & Sánchez Arteaga, H.M. (2010). Análisis térmico del grado de cocción en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

Espinosa Andrews, H., & Urias Silvas, J.E. (2012). Thermal properties of agave fructans (Agave tequilana Weber var. Azul). *Carbohydrate Polymers*, 87, 2671-2676.

Estrada, S.L. (1993). Estudios sobre el potencial técnico de aprovechamiento de la goma, vainas, hojas y madera del mezquite (*Prosopis* spp.) en México. Tesis de Licenciatura. *Universidad Nacional Autónoma de México*.

Fagg, C. & Stewart, J. (1994). The value of Acacia and Prosopis in arid and semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 27: 3-25.

Farkas J. & Csilla Mohácsi Farkas. (1996). Application of Differential Scanning Calorimetry in food research and food quality assurance. *Journal of Thermal Analysis*, 47,1787-1803.

FAO (2010). Código Alimentario Argentino. Modificación y resolución Conjunta N° 56/2010 y 538/2010. Artículo 681 tris. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Fellows, P. (2000). Food processing technology: principles and practice. Tecnología del procesado de los alimentos: principios y práctica. Ed. CRC Press. *Woodhead Publishing Limited*.

Felker, P., & Bandurski, R. S. (1977). Protein and amino acid composition of tree legume seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28(9), 791-797.

Felker P., Grados N., Cruz G., & Prokopiuk D. (2003). Economic assessment of production of flour from Prosopis alba and P. pallida pods for human food applications. *Journal of Arid Environments*. 53: 517–528.

Felker. R. del Valle, E. Marco, R. Beckeri & R. M. Saunders. (1988). Evaluation of an industrial process for producing protein enriched mesquite pod (prosopis species) flour. *Journal of Food Processing & Preservation*. 12: 179-185

Felker, P., Takeoka, G., & Dao, L. (2013). Pod mesocarp flour of North and South American species of leguminous tree prosopis (mesquite): Composition and food applications. *Food Reviews International*, 29(1), 49-66.

Fennema Owen, R. (2000). Química de los alimentos. *Ediciones ACRIBIA, SA*.

Ffolliott, P. F., & Thames, J. L. (1983). Manual sobre taxonomía de Prosopis en México, Perú y Chile. FAO.

Figueiredo, A. A. (1990). Mesquite: history, composition, and food uses. *Food technology*, 44(11), 118-128.

Foegeding E.A. (1988). Thermally induced changes in muscle proteins. *Food Technol*. 46(6):58,60-62.

Fontana Jr, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2008). Water activity in foods: fundamentals and applications. *John Wiley & Sons*.

Freyre, M., Astrada, E., Blasco, C., Baigorria, C., Rozycki, V., & Bernardi, C. (2000). Valores nutricionales de frutos de vinal (*Prosopis ruscifolia*): consumo humano y animal. *CYTA-Journal of Food*, 4(1), 41-46.

García E.E. (2011). Optimización del secado por aspersión del mucílago de pitahaya en función de sus propiedades reológicas. Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional: Oaxaca, México. 93 p.



Gálvez, A.V., Aravena, E.L. & Mondaca, R.L. (2006). Isotermas de Adsorción en Harina de Maíz. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 26 (4), 821-827.

García E.E. (2011). Optimización del secado por aspersión del mucílago de pitahaya en función de sus propiedades reológicas. Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional: Oaxaca, México. 93 p.

García M. G. E., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., González, R., H., Carrilo, P., A., Espinosa, R., M., & García G. D. A. (2014). Biomasa de dos especies de matorral en tres densidades de plantación en Tamaulipas, México. *Rev. Lat. Rec. Nat.* Pp. 52-59.

García Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Clemente, G., & Mulet, A. (2008). Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *LWT*, v. 41, p. 18-25.

Geankoplis, C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Continental.

Geilfus, F. G. (1994). El árbol al servicio del agricultor: Manual de agroforestería para el desarrollo rural. Guía de especies. El árbol al servicio del agricultor: Manual de agroforestería para el desarrollo rural. *CATIE*, Turrialba (Costa Rica).

Ghodake, H.M. & Goswami, T.K. (2005). Moisture Sorption Isotherms, Heat of Sorption and Vaporization of Withered Leaves, Black and Green Tea. *Agricultural and Food Engineering Department. Indian Institute of Technology.*

Gimeno, M.T., Elía M., Motilva, M. (2010). Interés de la caracterización nutricional en productos de panadería. *Alimentaria*. 413: 55-58.

Goldstein, J. (2003) Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. *Kluwer Academic/Plenum Publishers*, 689.

Grados, N., Ruiz, W., Cruz, G., Díaz, C., & Puicón, J. (2000). Productos industrializables de la algarroba peruana (*Prosopis pallida*): Algarrobina y Harina de Algarroba. *Multequina*, 9(2), 119-132.

Grados N., & Cruz, G. (1996). New Approaches to Industrialization of Algarrobo (*Prosopis pallida*) Pods in Peru. *Prosopis: Semiarid fuelwood and forage tree*. 3-25.

Grau, A., Boix, A. C., & Maupoey, P. F. (1998). Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J Res Natl Bur Stand*, 81(1):89-96.

Gutiérrez L.F., Arias S., Garzón D., López D.M., & Osorio A. (2014). Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos. *Rev Vector*, 9: 21-28.

Hamano, M. & Aoyama, Y. (1974) *Nippon Nogei Kagaku Kaishi*. 48, 619-625.

Hassini, L., Bettaieb, E., Desmorieux, H., Torres, S. S., & Touil, A. (2015). Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds. *Industrial Crops and Products*, 457-465.

Heldman, Dennis R., B. Lund, Daryl & Sabliov Christina. (2006). Handbook of Food Engineering, Second Edition. *Taylor & Francis Group*. p, 350-356.

Henao Osorio, S., & Aristizábal Galvis, J. (2009). Influencia de la variedad de yuca y nivel de sustitución de harinas compuestas sobre el comportamiento reológico en panificación. *Ingeniería e Investigación*, 29:1, 39-46.

Hugo W., & Godiño M. (2000). Tecnología de almacenamiento de granos de trigo. *Unidad de Difusión e Información Tecnológica del INIA*, Uruguay.

Iglesias, H. A. & Chirife, J. (1982). Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components. *Academic Press*, New York.

IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales). Norma IRAM 15854, 2010. Moliend experimental para trigo pan. Parte I: Preparación y acondicionamiento de la muestra. Parte II: Método Bühler. Buenos Aires, Argentina. (<http://www.iram.org.ar>). Consultado el 22/03/2012.

ISO 13320. (2009). Technical Committee ISO/TC 24. Particle characterization including sieving, Subcommittee SC 4, Particle characterization. Particle size analysis — Laser diffraction methods.

ISO 27971. (2008). Cereals and cereal products - Common wheat (*Triticum aestivum* L.) - Determination of alveograph properties of dough at constant hydration from commercial or test flours and test milling methodology.

Kauzmann W. (1959). Some factors in the interpretation of protein denaturation. *Adv Prot Chem*, 14, 1-63.

Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Tsami E., & Marinos Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 20, 55-74.

Knowlton, T. M. Carson J. W., Klinzing, G. E., & Yang, W. C. (1994). The importance of storage, transfer and collection. *Chemical Engineering Progress*, 90, 44-54.

Kresisch T. V. (2016). Mezclas y grumos. Problemas y soluciones. Ediciones Paraninfo, 1: 3-16.

Labuza, T. P. (1984). Moisture sorption: practical aspects of isotherm measurement and use. St. Paul, MN: *American Association of Cereal Chemists*.

Labuza, T.P., & Altunakar, B. (2007) Water prediction and moisture sorption isotherms. In *Water Activity in Foods*, IFT Press, Blackwell Publication, 109-154.

Lagoudaki, M., Demertzis, P. G., & Kontominas, M. G. (1993) Moisture adsorption behavior of pasta products. *Lebensmittel - Wissenschaft Und Technologi* 26, 512-516.

León, P. G., Tolaba, M. P., Reid, C., Mocchiola, J. R., & Pollio, M. L. (2012). Grain Sorption Equilibria of Algarroba Flour. *International Journal of Food Engineering*, 8(2).

Leung, H. K. (1986). Water activity and other colligative properties of foods. In physical and chemical properties of foods. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, M. I.

Levine H. & Slade L. (1990) Influences of the glassy and rubbery states on the thermal, mechanical and structural properties of doughs and baked products. In: Faridi H and Faubion JM, Eds, *Dough Rheology and Baked Product Texture*. New York: AVI, pp. 157–330.

López Ortiz, N. C., Tique, M. M., Lavalle, P., & del Socorro, L. (2011). Contribución al estudio del sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para nutrición humana. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 13(1), 33-44.

Marques Pereira, J. A., & Marcal de Queiroz, D. (1991). Principios de secado de granos psicometría higroscopía. *Serie Tecnología Poscosecha (FAO)*. No 8.

Martínez N., Andrés A.M., Chiralt A., & Fito P. (2000). *Temodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Segunda ed. Editorial UPV: Valencia.

Mayor, L., Moreira, R., Chenlo, F., & Sereno, A. M. (2005). Water sorption isotherms of fresh and partially osmotic dehydrated pumpkin parenchyma and seeds at several temperatures. *European Food Research and Technology*, 220: 163-167.

Mathlouthi M., & Rogé B. (2003). Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food Chemistry*, 82: 61-71.

Mettler Toledo. (2013). Handbook: Thermal Analysis of Polymers. *Selected Applications*, 1, 3-37.

Meyer, D. (1984). Processing, utilization and economics of mesquite pods as a raw material for the food industry (Doctoral dissertation, Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 7688, 1984. Ref.: H. Neukom; Korref.: F. Escher).

Meyer, D., Becker, R., Gumbmann, M. R., Vohra, P., Neukom, H., & Saunders, R. M. (1986). Processing, composition, nutritional evaluation, and utilization of mesquite (*Prosopis* spp.) pods as a raw material for the food industry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 34(5), 914-919.

Mom, M. P. (2012). Caracterización estructural y propiedades funcionales de las harinas de los frutos de *Prosopis alba* Griseb., *P. chilensis* (Molina) y *P. flexuosa* DC. Desarrollo de un proceso de secado, molienda y mezcla para optimizar la calidad del producto. *Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*. Universidad de Buenos Aires.

Monroy Godínez L.A., Monreal Martínez D., Valdez Paz R., & Oviedo Ramírez T.G. (2014). El mezquite (*Prosopis laevigata*) alternativa económica para el valle del mezquital. *Universidad Nacional Autónoma de México*. 1-9.

Moorthy S., Andersson L., Eliasson A., Santacruz S. & Ruales J. (2006). Determination of Amylose Content in Different Starches Using Modulated Differential Scanning Calorimetry. *Starch/Starke*, 58, 209-214.

Nava, D., Cruz, M. T., & Anaya, I. (2010). Elaboración de isothermas de sorción para *Phaseolus vulgaris* y cálculo de parámetros termodinámicos de sorción. *International Journal of Food Engineering*.

NMX-F-007-1982. ALIMENTO PARA HUMANOS. HARINA DE TRIGO. FOODS FOR HUMANS. WHEAT FLOUR. NORMAS MEXICANAS. DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SSA1-1996, BIENES Y SERVICIOS. Cereales y sus productos. Harinas de Cereales, Semolas o Semolinias. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, harinas, semolas o semolinias o sus mezclas. Productos de panificación. disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales.

Oduol, P. A., Felker, P., Mckinley, C. R., & Meier, C. E. (1986). Variation among selected *Prosopis* families for pod sugar and pod protein contents. *Forest Ecology and Management*, 16(1-4), 423-431.

OMS/FAO. 1989. Cereales, L. Leguminosas y Productos Proteínicos Vegetales. Norma del Codex alimentarius. CODEX STAN, 171-1989. Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Ortegas Rivas, E. (2005). Handling and Processing of Food Powders and Particulars, Capítulo 4 "Encapsulated and Powdered Foods). Ed. Onwulata C., CRS Press, *Taylor and Francis Group*, USA.

Ortiz P. S. A. (2006). Determinación de la composición química proximal y fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del sureste del estado de Hidalgo. Tesis de Nutrición. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Pp 10-11

Palacios, R. A. (2006). Los mezquites mexicanos: biodiversidad y distribución geográfica. *Bol. Soc. Bot*, 41(1-2), 99-121.

Palacios, R. & Hoc, P. (2005). Revisión del género *Prosopidastrum* (Leguminosae) para la Argentina. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 40: 113-128.

Patist A., & Zoerb H. (2004). Preservation mechanisms of threulose in food and biosystems. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 40: 107-113.

Peleg M. (1983). Physical Properties of Foods (Peleg, M. and Bagley, E., eds), Pp. 293-323.

Peleg, M. (1977). Flowability of food powders and methods for its evaluation: a review. *J. Food Process Eng.* 1: 303-328.

Perry, R., & Green, D. (2003). Manual del Ingeniero Químico. Mc Graw Hill. 3:(7), 12-115.

Pereira de Gusmao R., Eduardo Rangel M., Cavalcanti Mata M., Martins Duarte M. E., Souza Gusmao T. A. (2016). Particle size, morphological, rheological, physicochemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Prosopis juliflora*). *Journal of Cereal Science*, 69, 119-124.

- Peschl IASZ. (1989). Measurement and evaluation of mechanical properties of powders. *Powder Handling and Processing*. 1:135–142.
- Prior, B. A. (1979). Measurement of water activity in foods: A review. *Journal of Food Protection*. 42(8), 668-674.
- Prokopiuk, D. B. (2004). Sucedáneo del café a partir de algarroba (*Prosopis alba griseb*) (Doctoral dissertation).
- Prokopiuk, D., Martínez Navarrete N., Amparo Chiralt A. & Cruz, G. (2010). Influence of Roasting on the Water Sorption Isotherms of Argentinean Algarroba (*Prosopis alba Griseb*) Pods. *International Journal of Food Properties*. 13:4, 692–701.
- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Traten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol 85, p. 1805–1814.
- Ramírez, M. M. (2012). Determinación de isotermas de sorción en harina de maíz a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Recondo M.P., Elizalde B.E., Buera M.P. (2006). Modeling temperature dependence of honey viscosity and of related supersaturated model carbohydrate systems. *Journal of Food Engineering*, 77(1): 126-134.
- Requena Peláez J. M. (2013). Harinas: derivados, féculas y almidones. *Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas*, 45, 1-9.
- Reséndez Velázquez, K. L. (2014). Evaluación del daño por insectos en la vaina de *Prosopis laevigata* (Willd) MC Johnst en una zona mezquitera del estado de Durango. Tesis de Maestría en Ciencias de Gestión Ambiental. Instituto Politécnico Nacional.
- Reyes M., Ramírez G. (2016). La bolsa plástica hermética: otra opción para almacenar granos. Programa de Intensificación Sustentable CIMMYT. Unidad de Poscosecha MasAgro.<http://conservacion.cimmyt.org/index.php/es/publicaciones/1847-la-bolsa-plastica-hermetica-otra-opcion-para-almacenar-granos>. Última revisión: 22 de mayo de 2016.
- Reza, Falsafi. (2014). DSC Application 2. *Food Science and Technology*.
- Rhodes, Martin. (2008). Particle Size Analysis. Introduction to Particle. 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd. 1 – 27.
- Richards A.B., Krakowka S., Dexter L., Schmid H., Wolterbeck A., Waalkens Berendsen D., Shigoyuki A., & Kurimoto M. (2002). Trehalose: a review of properties, history of use and human tolerance, and results of multiple safeties studies. *Food and chemical toxicology*, 40: 871-898.
- Rodríguez Saucedo, E. N., Rojo Martínez, G. E., Ramírez, Valverde. B., Marinez Ruiz R., Cong Hermida M.C., Medina Torres, S. M., & Piña Ruiz, H. H. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata Humb. & Bonpl. ex Willd.*) en México. *Ra Ximhai*, 10(3), 173-193.

- Roos, Y.H. (1995). Phase Transitions in Foods. San Diego CA: *Academic Press*, p. 361.
- Rüegg M., Moor U., & Blanc B. (1975). Hydration and thermal denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin. A calorimetric study. *Biochim Biophys Acta* 400, 334–342.
- Ruiz T. D. (2011). Uso potencial de la vaina de mezquite para la alimentación de animales domésticos del Altiplano potosino. Tesis de maestría de la Facultad de ciencias ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Sablani, S.S., Kasapis, S., Al-Rahbin, M., & Mugheiry A. (2002). Water Sorption Isotherms and Glass Transition Properties of Gelatin. *Drying Technology*. 20(10), 2081-2092.
- SAGARPA. (1977). Inventario Nacional Forestal. *Secretaria de Agricultura de México*.
- SAGARPA. (2015). Identifican municipios con Zonas Áridas y Semiáridas. <https://www.gob.mx/sagarpa>.
- Saunders, R. M., Becker, R., Meyer, D., Del Valle, F. R., Marco, E., & Torres, M. E. (1986). Identification of commercial milling techniques to produce high sugar, high fiber, high protein, and high galactomannan gum fractions from Prosopis pods. *Forest ecology and management*, 16(1-4), 169-179.
- Shah R.B., Tawakku MA & Khan M.A. (2008). Comparative evaluation of flow for pharmaceutical powders and granules. *Pharm Sci Tech*. 9: 250-258.
- Sánchez Álvarez, E., Huerta Mora, I. R., & Eugenia, C. Determinación y Evaluación Matemática de la Actividad de Agua en Alimentos. *V Congreso Internacional de Ingeniería Bioquímica*.
- Sciammaro, L., Ferrero, C., & Puppo, M. C. (2016). Chemical and nutritional properties of different fractions of Prosopis alba pods and seeds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-10.
- Schulze D. (1996). Measuring powder flowability. A comparison of test methods. *Powder Bulk Eng*. 10: 17-28.
- Servin Rodas, Ma. Del Carmen. (2013). Nutrición básica y aplicada. Universidad Nacional Autónoma de México. 2ª Edición.
- SIAP. (2014). ATLAS de Zonas Áridas de México. *Documento Técnico de SAGARPA Y SIAP*. 1: 9-162.
- Simpson, B. B. (1977). Mesquite: its biology in two desert scrub ecosystems. USA. Synthesis Series. Stroudsburg, Pennsylvania.
- Slade, L. & Levine, H. (1991) *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr*. 30,115-360.
- Smith, C. (1967). Plant remains. En: Byers, D. (ed). The prehistory of the Tehuacan Valley. *Environment and Subsistence*, I: 220-255.

Solbrig, O. T., & Cantino, P. D. (1975). Reproductive adaptations in *Prosopis* (Leguminosae, Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*, 56(2), 185-210.

Sperling, L.H. (1992). Introduction to Physical Polymer Science, 2nd ed. New York: Wiley, p. 594.

Sutton, H.M. (1976). Flow properties of powders and the role of surface character. *Characterization of Powder Surfaces*. Academic Press, New York.

Teunou, E., Fitzpatrick, J. J., & Synnott, E. C. (1998). Characterisation of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 39, 31-37.

Tietz, N. W. (2006). Textbook of Clinical Chemistry and Molecular Diagnostics. Elsevier Saunders. Vol. 564.

Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherm of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters. *Journal of Food Engineering*, 48, 19-31.

Trobok, S. (1985). Morfología de frutos y semillas de *Prosopis* (Fabaceae-Mimosoideae) chilenos. Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*, 239-253.

Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 14, 327–335.

Tsami, E., Marinos-Kouris, D., & Maroulis, Z. B. (1990). Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. *Journal of Food Science*, 55, 1594–1597.

Valenzuela Núñez, L. M., Trucíos Caciano, R., Ríos Saucedo, J. C., Flores Hernández, A., & González Barrios, J. L. (2011). Caracterización dasométrica y delimitación de rodales de mezquite (*Prosopis* sp) en el Estado de Coahuila. *Revista Chapingo*. Serie ciencias forestales y del ambiente. Pp.87-96.

Van Den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems. In: Rockland, L.B., Stewart, F. (Eds.), *Influence on Food Quality*. Academic Press, New York, pp. 147–177.

Vicente L.G. & Castrillón Rodríguez T. (2015). Bolsas y sacos de papel. Dpto. Tecnologías del Envase de ainia. *Guía técnica ainia de envase y embalaje*. <http://www.guiaenvase.com/bases/guiaenvase.nsf/V02wp/F536BB0ED8FE10DBC1256F250063FA9C?Opendocument>. Última revisión: 25 de mayo de 2016.

Weininger S. J., & Stermitz F. R. (1988). Química orgánica. Editorial Reverté. Barcelona, España. Pp. 812-813.

Westgate, N., Lee, J. Y., & Ladisch, M. R. (1992). Modelling of equilibrium sorption of water vapor on starchy materials. *American Society of Agricultural Engineers*, 35, 213-219.

Wolf, W., Spiess, W. E. L., & Jung, G. (1985). Standardization of Isotherm Measurements (Cost Project 90 and 90 bis). En: Simatos, D., Multon, J. L. (eds). *Properties of Water in Foods*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 661–679.

Zolfaghari, R., Harden, M., & Huffman, L. (1986). Some physical and chemical properties of honey mesquite pod (*Prosopis glandulosa*) and applications in food products. *Cereal Chem*, 63(2), 104-108.