

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo
Integral Regional Unidad Oaxaca

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de
Recursos Naturales

Secado convectivo de vainas de mezquite (Prosopis laevigata Humb. & Bonpl. Ex willd)

Tesis que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

Daniel López Cravioto

Directores de Tesis

Dr. Sadoth Sandoval Torres

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

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:
Secado convectivo de vainas de mezquite (prosopis laevigata humb. & bonpl. Ex willd)

Presentada por el alumno:

López Cravioto
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s) Daniel

Con registro:

A	1	6	0	1	7	3
---	---	---	---	---	---	---

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

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas

Dr. Luis Gerardo Barriada Bernal

Dra. Luicita Lagunez Rivera

Dr. Pedro Montes García

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



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



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca el día 11 del mes mayo del año 2018, el (la) que suscribe Daniel López Cravioto alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales con número de registro A160173, 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 del Dr. Sadoth Sandoval Torres y Dr. Juan Rodríguez Ramírez y cede los derechos del trabajo intitulado Secado convectivo de vainas de mezquite (prosopis laevigata humb.& bonpl. Ex willd), 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 Indanielcrav@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Daniel López Cravioto

Nombre y firma



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

Resumen

El Mezquite es un árbol que crece en las regiones áridas y semiáridas del mundo. Ha sido utilizado como material de construcción, forraje para animales, combustible y alimento para el ser humano. Las vainas que este árbol produce presentan un amplio potencial para el desarrollo de alimentos por su alto contenido de carbohidratos, proteínas y fibra. Sin embargo se requiere de un proceso de secado específico para que estas vainas puedan ser procesadas. En la presente investigación se estudió el proceso de secado para vainas de mezquite de la especie *Prosopis laevigata* recolectadas en Oaxaca y Durango, México. Las vainas se caracterizaron físicamente, se determinaron las etapas de madurez, se realizaron experimentos de secado, se desarrolló un modelo empírico con base a los datos experimentales de secado utilizando el método de la curva característica. Los coeficientes de difusión efectiva fueron calculados.

Se identificaron 3 etapas de madurez considerando los cambios en el color de las vainas, utilizando el método CIELAB, cambios en el contenido de azúcares y diferencias en el contenido de humedad. Se obtuvieron imágenes de la vaina y sus semillas con un Estereomicroscopio Amscope SE305-PX-LED-RK15 y de la microestructura utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-IT300LV. Se observó una microestructura heterogénea y tortuosa.

Los experimentos de secado se realizaron en un secador de bandejas tipo túnel a diferentes condiciones de temperatura (40 °C, 50 °C y 60 °C), velocidad del aire constante de 2.6 m/s y humedad relativa constante de 10%. En cada experimento se observó un efecto importante de la etapa de madurez y del nivel de temperatura. El nivel de madurez modifica el contenido de humedad y de azúcares de las vainas, y el nivel de temperatura afecta la rapidez de evaporación. Se identificó que el nivel mínimo de temperatura para que las vainas alcancen un contenido de humedad bajo y puedan ser granuladas es de 60 °C. Para el cálculo de la curva característica de secado se utilizó una ecuación lineal que representó la mayor parte de la cinética basándose en los datos experimentales; esta ecuación describió satisfactoriamente el comportamiento de las cinéticas experimentales de secado para cada condición.

Por último se calcularon los coeficientes de difusión efectivos utilizando las tablas de difusividad para una geometría cilíndrica y con la información experimental de secado. El valor del coeficiente se ve afectado por la temperatura del aire de secado, incrementándose a medida que el nivel de temperatura incrementa.

Abstract.

The Mesquite is a tree that grows in the arid and semi-arid regions of the world. It has been used as a building material, fodder for animals, fuel and food for the human being. The pods that this tree produces present a wide potential for the development of foods due to their high content of carbohydrates, proteins and fiber. However, a specific drying process is required so that these pods can be further processed. In the present investigation, the drying process for mesquite pods of *Prosopis laevigata* species collected in Oaxaca and Durango, Mexico was studied. The pods were physically characterized, the maturity stages were determined, drying experiments were carried. Finally, the effective diffusion coefficient was calculated using diffusivity tables.

Three stages of maturity were identified considering the changes in the color of the pods (CIELAB method), changes in the content of sugars and changes in moisture content. Images of the pod and its seeds were obtained with an Amscope Stereomicroscope SE305-PX-LED-RK15 and microstructure using a JEOL JSM-IT300LV scanning electron microscope. A heterogeneous and tortuous microstructure was observed.

The drying experiments were carried out in a tray dryer with a tunnel at different temperature conditions (40 ° C, 50 ° C and 60 ° C), constant air velocity of 2.6 m / s and a constant relative humidity of 10% . The level of maturity modifies the moisture content and sugars of the pods, and the temperature level affects the evaporation rate. It was found that the minimum temperature level for the pods to reach a low moisture content and can be granulated is 60 ° C. For the calculation of the drying characteristic curve, a linear equation was used that represented most of the kinetics based on the experimental data; This equation satisfactorily describes the behavior of the experimental kinetics of drying for each condition.

Finally, the effective diffusion coefficients were calculated using the diffusivity tables for a cylindrical geometry and the experimental drying data. The value of the coefficient is affected by the temperature of the drying air, increasing as the temperature level increases.

Agradecimientos.

Al Instituto Politécnico Nacional, por permitirme continuar mi preparación profesional y personal.

Al Dr. Sadoth Sandoval Torres por su apoyo, guía, conocimientos y paciencia como Director de esta tesis, le estaré eternamente agradecido.

Al Dr. Juan Rodríguez Ramírez, Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas, Dr. Emilio Hernández Bautista, M.C. Laura Aquino González, M.C. Frank Manuel León Martínez, por su guía y durante el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros Mario, Ángel, Mayra, Yajaira y Magda por sus conocimientos y guía durante el desarrollo esta tesis.

A mi amor Larissa por su apoyo durante esta tesis y en todas las cosas que nos proponemos.

A mi madre Cirenía por su eterno amor y apoyo.

Tabla de contenido.

Nomenclatura.....	iv
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Estado del arte.....	3
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos.....	7
Capítulo 2 Marco Referencial.....	8
2.1. El árbol de Mezquite.....	8
2.1.1. Origen y distribución del mezquite.....	8
2.1.2. La vaina de Mezquite.....	8
2.1.3. Estructura de la vaina.....	8
2.2. Secado de alimentos.....	9
2.2.1. Factores que afectan el secado.....	10
2.3. Actividad de agua.....	11
2.3.1. Agua libre.....	12
2.3.2. Agua ligada.....	12
2.4. Generalidades del secado.....	12
2.4.1. Determinación del contenido de humedad.....	12
2.4.2. Mecanismo de secado.....	14
2.4.3. Curva de rapidez de secado.....	15
2.4.4. Curva característica de secado.....	15
2.4.5. Contenido de humedad en equilibrio de los materiales.....	15
2.4.6. Equilibrio higroscópico.....	16
2.4.7. Interpretación del contenido de humedad de equilibrio de los materiales.....	16
2.4.8. Isotermas de sorción y desorción.....	16
2.4.9. Equipo para secado.....	17

2.4.10. Secadores de bandejas	18
2.5. Transferencia de calor.	18
2.5.1. Transferencia de calor por convección.....	19
2.5.2. Transferencia de calor en secadores de aire.	19
2.6. Transferencia de masa.	19
2.6.1. Transferencia de masa por convección.	20
2.6.2. Difusión en estado estacionario de gases y líquidos a través de sólidos.	21
2.6.3. Difusión de la humedad.....	21
2.7. Alimentos multidominio.	21
2.7.1. Difusión de la humedad en sistemas multidominio.....	22
2.7.2. Importancia del control de humedad para la estabilidad en alimentos multidominio.	22
2.8. Diseño de secadores.	23
Capítulo 3 Metodología.....	25
3.1. Diseño experimental.....	25
3.2. Materiales.	25
3.3. Recolección de las vainas.....	26
3.4. Limpieza.....	26
3.5. Selección de vainas de mezquite.	26
3.6. Determinación del estado de madurez.	27
3.7. Cuantificación de azúcares.....	27
3.8. Determinación del contenido de humedad.	27
3.9. Análisis de características físicas de las vainas.....	27
3.10. Secado.	28
3.11. Cálculo de la curva característica de secado.	29
3.12. Cálculo del coeficiente de difusión efectivo.	31
3.12.1. Difusión en estado no estacionario: cilindro sólido.	31
Capítulo 4 Análisis y Discusión de resultados.	34
4.1. Etapas de madurez.....	34
4.2. Contenido de azúcares.....	34
4.3. Características físicas.	35
4.3.1. Semillas.	35
4.3.2. Endocarpio.	36
4.3.3. Mesocarpio.	37

4.3.4. Epicarpio.	39
4.4. Contenido de humedad.	39
4.5. Experimentos de secado.	40
4.6. Curva característica de secado.	44
4.7. Coeficientes de difusión efectivo.	47
Capítulo 5: Conclusiones.	48
6. Bibliografía.	50
7. Anexos.....	54
7.1. Verificación de velocidad del aire en cámara del secador de bandejas tipo túnel.....	54
7.2. Procedimiento para el uso de la curva característica.....	58

Nomenclatura.

A Área superficial expuesta al secado (m²)

r Radio del cilindro (m)

A2 Área a través de la cual tiene lugar el flujo de calor (m²)

C Concentración de componente B (kg/(kg/m³))

C_I Constante de integración curva característica.

c Constante del cálculo de curva característica de secado

d Constante del cálculo de curva característica de secado

D_{AB} Difusividad del gas A o líquido en un sólido B

D Coeficiente de difusión efectiva (m²/s)

dW Rapidez de secado (g agua/g materia seca*min)

dW_{ref} Rapidez de secado de referencia

h_s Coeficiente de transmisión de calor superficial (1/Jm²sC)

m_b Flujo másico del componente B (kg/s)

q Velocidad de transmisión de calor (kj/kg*s)

SE_i Suma de errores cuadráticos

t Tiempo (segundos)

u Contenido de humedad (adimensional)

W Contenido de humedad (g agua/g materia seca)

W₀ Contenido de humedad inicial (g agua/g materia seca)

W_c Contenido de humedad crítico (g agua/g materia seca)

W_{eq} Contenido de humedad de equilibrio (g agua/g materia seca)

W_H Peso total del sólido húmedo (g).

W_r Contenido de humedad reducido (adimensional)

W_{cc} Contenido de humedad curva característica (g agua/g materia seca):

W_s Peso total del sólido seco (g).

Índice de figuras.

Figura 1. Contenido de humedad en función del tiempo.....	13
Figura 2. Curva de rapidez de secado.....	14
Figura 3. Isoterma de sorción GAB a 30, 35, 40 y 45 °C para polvo de mezquite <i>Prosopis laevigata Oaxaca</i>	17
Figura 4. Secador de bandejas o de anaqueles.....	18
Figura 5. Etapas de la experimentación.....	25
Figura 6. Vainas de mezquite especie <i>Prosopis laevigata</i>	26
Figura 7. Vainas con daño por insectos y hongos	26
Figura 8. Vainas acondicionadas sobre mallas de plástico previo al secado.....	28
Figura 9. Secador de bandejas tipo túnel con número de patente 304462.....	29
Figura 10. Cartas de difusividad en estado no estacionario para distintas geometrías	33
Figura 11. Toma longitudinal de las semillas.....	35
Figura 12. Corte transversal de la semilla.....	36
Figura 13. Corte longitudinal del endocarpio.....	36
Figura 14. Corte transversal del endocarpio.....	37
Figura 15. Corte longitudinal de vaina de mezquite.....	38
Figura 16. Corte transversal del mesocarpio.....	38
Figura 17. Corte transversal del epicarpio.....	39
Figura 18. Cinéticas de secado experimentales (40 °C y 50 °C).....	40
Figura 19. Cinéticas de secado experimentales (60 °C).....	41
Figura 20. Curvas de rapidez de secado experimentales.....	42

Figura 21. Cinéticas de secado y perfiles de temperatura de las vainas (40 °C y 50 °C)...	43
Figura 22. Cinéticas de secado y perfiles de temperatura de las vainas (60 °C).....	43
Figura 23. Cinéticas de secado normalizadas.....	44
Figura 24. Rapidez de secado reducida a diferentes temperaturas.....	45
Figura 25. Comparación datos experimentales con la curva característica (40 °C, 50 °C).....	45
Figura 26. Comparación datos experimentales con la curva característica Oaxaca y Durango (60 °C).....	46
Figura 27. Esquema de la 1ª sección de la cámara del secador bandejas.....	54
Figura 28. Primera sección de la cámara de secado evaluada.....	55
Figura 29. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (1ª Sección).....	55
Figura 30. Esquema de la 2ª sección de la cámara del secador bandejas.....	56
Figura 31. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (2ª Sección).....	56
Figura 32. 3ª sección de la cámara de secado evaluada.....	57
Figura 33. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (3ª Sección).....	57
Figura 34. Indicación de la rapidez de secado de referencia (W_{ref}).....	58
Figura 35. Indicación del contenido de humedad crítico (W_c) y contenido de humedad de equilibrio (W_{eq}).....	58
Figura 36. Calculo de W a t 150 minutos utilizando ecuación de curva característica.....	59

Índice de tablas.

Tabla 1. Actividad de agua mínima (a_w), para el crecimiento microbiano y germinación de esporas.....	12
Tabla 2. Diseño experimental secado (todo por triplicado).....	25
Tabla 3. Parámetros de color CIELAB de vainas de mezquite en diferentes etapas de madurez (<i>Prosopis laevigata</i>).....	34
Tabla 4. Contenido de azúcares en los diferentes estados de madurez de vainas de mezquite.....	34
Tabla 5- Parámetros calculados para la curva característica.....	46
Tabla 6 Valores de D_{eff} para las vainas de mezquite a diferentes condiciones de secado...	47

Capítulo 1 Introducción.

Los mezquites (*Prosopis spp*) y especies afines, son especies que prosperan y se distribuyen en las regiones áridas y semiáridas del planeta. Proporcionan combustible y material para construcción, ofrecen sombra y alimento para los humanos y animales. Los mezquites eran muy importantes para muchas comunidades indígenas del continente Americano (Rzedowski, 1988).

En el norte de Argentina las vainas son secadas y molidas para obtener harina, la cual se sigue consumiendo hoy en día en forma de un pan conocido como “Patay” (De Corneli, 1996). En Perú, las vainas se secan y convierten en harina para la elaboración de pan, pasteles o papilla. Tradicionalmente las vainas secas se trituraban en un mortero para elaborar una harina gruesa o utilizando diversas variedades de molinos de piedra (Felger, 1977). En el norte de México, las etnias que habitaban las zonas desérticas aprovechaban las vainas de mezquite como fuente de alimento, secándolas al sol. En algunos casos se preparaban harina y masa y con las vainas maduras preparaban una especie de pulpa dulce (Simpson, 1977).

En la actualidad, el aprovechamiento en la industria alimentaria de las vainas de mezquite es mínimo. Las vainas de mezquite están constituidas principalmente por proteína, carbohidratos, calcio, hierro y fibra dietética, por lo que podría tener usos en la industria alimentaria. Con este potencial se puede revalorizar el árbol del mezquite, propiciando que los pobladores de las regiones en donde se encuentra, cuiden los árboles para la producción de las vainas y se evite así la tala de los mismos (Prokopiuk *et al*, 2000).

Las vainas de mezquite están constituidas por diferentes componentes, dentro de ellos el mesocarpio, el cual al tener una alta concentración de azúcares tiene propiedades higroscópicas elevadas, por lo cual dificulta su secado y posterior molienda (Meyer, 1984; Felker *et al*, 2003).

Su adición en combinación con harinas de cereales en formulaciones de panadería, proveen de una mezcla de proteína de mayor valor nutricional (Bigne, 2016). El estudio de las vainas de mezquite es importante; ya que la variedad de productos que se pueden obtener de esta son de amplio rango. Las harinas presentan diversas propiedades funcionales: capacidad de absorber agua, capacidad de absorber grasas, gelatinización, emulsionante y estabilizador, en ocasiones superando a otras leguminosas y cereales (De la rosa *et al*, 2006).

En la actualidad, la obtención de la harina de mezquite sigue presentando dificultades, pues en ambientes de humedad relativa alta, el mesocarpio provoca que las vainas absorban humedad rápidamente. (Meyer, 1984). Si las vainas no son secadas antes de someterlas a molienda, tienden a adherirse y atascarse en el molino dificultando la obtención de un material de calidad (Felker *et al*, 2003). Por otro lado, la absorción de humedad provoca que las vainas sufran reacciones secundarias y sufran descomposición.

1.1. Planteamiento del problema.

El secado de alimentos tiene por objetivo mejorar la estabilidad de almacenamiento, disminuir los costos de transporte, minimizar los requisitos de embalaje y disminuir el peso de los productos, es el método consagrado para la conservación de alimentos y uno de los más importantes en la industria de procesamiento de alimentos y en la sociedad (Hui, 2008). En los últimos años se ha incrementado el consumo de alimentos étnicos, principalmente se trata de cubrir una creciente demanda hacia la búsqueda de alimentos que incluyen ingredientes y técnicas culinarias cuyas raíces se encuentran en otras regiones.

El mezquite es un árbol leguminoso que crece en zonas áridas y semiáridas de todo el mundo, en México se encuentra en los estados del norte, centro y sur (De La Rosa, 2006). Las vainas que este árbol produce tienen un alto contenido de proteínas, carbohidratos, calcio, hierro y fibra. (Choge *et al*, 2007). Su importancia radica en su amplio potencial para la elaboración de productos de consumo humano, pues ha sido utilizado como pan, atole, harina, bebidas alcohólicas y jarabe (De La Rosa, 2006).

En Oaxaca, la fundación tejiendo alianzas y personas de la comunidad de Santiago Suchilquitongo, están interesados en el aprovechamiento de las vainas de mezquite, en particular para la producción de harinas. Para ello son primordiales los siguientes aspectos: identificar las etapas de madurez, identificar el nivel de temperatura mínimo requerido e identificar la microestructura del material

El árbol de mezquite es abundante y poco utilizado; y el secado solar es el método más utilizado pues reduce los costos de secado, sin embargo está sujeto a condiciones ambientales (Víglaský *et al*, 1987). Un inconveniente del secado solar es que las vainas no alcanzan un contenido de humedad suficientemente bajo, provocando reacciones de descomposición, ataque por insectos y proliferación de hongos (Grados *et al*, 2000).

Por lo cual el presente trabajo se propone caracterizar las etapas de madurez, identificar la microestructura del material y analizar operaciones de secado bajo condiciones controladas. Para ello se analizan las variaciones en el color y contenido de azúcares, se obtienen imágenes por microscopía de barrido electrónico y se analizan las curvas de secado derivando una expresión empírica. Así mismo se analizan los datos experimentales de secado para cada condición.

1.2. Estado del arte.

Para la utilización de vainas de mezquite se requiere un método de secado específico. Meyer (1984), estudió el proceso de secado de vainas de mezquite. Las vainas tienen un contenido de humedad bajo de forma natural en ambientes áridos. Sin embargo en áreas con humedad relativa elevada tienden a absorber humedad rápidamente, debido a la alta higroscopicidad del mesocarpio. Se estableció que es necesario secar las vainas antes de cualquier procesamiento posterior. Se utilizaron vainas de 3 diferentes especies (*Prosopis velutina*, *Prosopis chilensis* y *Prosopis taumaturgo*); se utilizó un secador de túnel aplicando una temperatura de 70°C y una velocidad del aire de 250 m/min. Las vainas secadas a temperaturas superiores a 75°C mostraron un quemado parcial o pardeamiento de las vainas; para temperaturas de secado menores a 65°C, los tiempos de secado aumentaron rápidamente. La harina obtenida de las vainas mostró un alto contenido de azúcares, proteína, alto contenido de fibra y un bajo contenido de ácidos grasos.

Grados *et al* (1996), desarrollaron un proceso de secado de vainas de mezquite. Se consideró que por el alto contenido de azúcares del mesocarpio las vainas son un material muy higroscópico. Para el secado se utilizó un secador de túnel por aire forzado aplicando temperaturas de 60 °C y 70 °C. El secado es una operación necesaria para la molienda posterior pues las vainas con un contenido de humedad mayor a 5% o 6% en base húmeda presentan dificultades al ser molidas. El polvo que se obtiene se puede utilizar para la elaboración de jarabes por su alto contenido de azúcares, como harina enriquecida en proteína o como suplemento con alto contenido de fibra.

Grados *et al* (2000), estudiaron un proceso para la obtención de harina de mezquite. Una vez seleccionadas las vainas fueron sometidas a un proceso de pre-secado para disminuir la humedad inicial alrededor de 0.14-0.12 en base seca. Durante el secado se aplicó una temperatura de 90 °C durante 7 horas, la humedad final de las vainas alcanzada fue de 0.06 en base seca, permitiendo la molienda del material.

Felker *et al* (2003), estudiaron la evaluación económica de la producción de harina de mezquite de dos especies (*Prosopis alba* y *Prosopis pallida*). Se encontró que debido al elevado contenido de azúcar en las vainas es necesario secarlas hasta un 6% contenido de humedad final; evitando al mismo tiempo que la harina se adhiera a las paredes del molino utilizado. El secado se llevó a cabo en un horno por convección de aire a 60 °C durante 60 horas reduciendo la humedad de un 12% inicial hasta un 6% en base húmeda final; posteriormente se molió. La harina obtenida presentó un elevado contenido de proteína, carbohidratos y fibra.

De la Rosa *et al* (2006), recolectaron vainas de mezquite en el estado de Guanajuato, México. Las vainas fueron procesadas mediante secado a 60 y 70°C hasta obtener pesos constantes y sometidos a molienda con un molino de martillos. El contenido total de proteína en base seca

fue similar en ambas temperaturas de secado, obteniendo una cantidad similar a otros cereales como el maíz, pero menor que el encontrado en otras leguminosas como chicharos y soya. El contenido de carbohidratos, grasa, fibra cruda y cenizas no presentó diferencias significativas en las dos temperaturas de secado utilizadas.

Figuroa *et al* (2006), estudiaron el secado solar de vainas del mezquite de las variedades: *Prosopis nigra*, *Prosopis alba*, *Prosopis Chilensis* y *Prosopis flexuosa*. Los autores reportan que se necesitan de 3 a 5 días de buen sol con un promedio de 11 horas diarias de exposición ininterrumpida en un horario de 8 a 19 horas aproximadamente. Las vainas pueden conservarse hasta por 12 meses. Encontraron que el rendimiento de la harina es del 50% respecto al peso de vainas secas alimentadas al molino.

Cruz *et al* (2012) estudiaron el proceso de secado solar de las vainas de mezquite en comunidades de Argentina. La harina obtenida se considera un alimento con alto contenido en proteína, calcio, hierro y un regulador intestinal por su alto contenido en fibra. El secado utilizado de manera tradicional requiere un periodo de 10 días (dependiendo de las variaciones en el clima el proceso puede alargarse hasta 20 días), con un promedio de exposición al sol de 11 horas al día; lo anterior para que las vainas estén en su punto óptimo de molienda.

Mom (2012) utilizó vainas de mezquite de 3 especies distintas (*Prosopis alba*, *Prosopis chilensis* y *Prosopis flexuosa*), aplicó un proceso de secado, molienda y mezcla para optimizar la calidad de dicho producto. Para cada una de las especies estudiadas obtuvo cinéticas de secado a 40, 50, 60 y 70 °C durante 250 minutos, humedad relativa de 4-10% y velocidad de aire de 4 m/s. La rapidez de deshidratación fue muy pronunciada al inicio del proceso y disminuyó gradualmente a medida que se acercó a las condiciones de equilibrio. Se determinó que el efecto de la temperatura es diferente y significativo para cada especie. Además de que la rapidez de secado es más alta al inicio del proceso, la rapidez se incrementa cuando la temperatura de secado aumenta (70° C > 60° C > 50° C > 40° C). Se observó un efecto importante de la temperatura de secado para el proceso a 40 °C y 50 °C, sin embargo un comportamiento similar para 60 °C y 70 °C. Con excepción de los experimentos a 40 °C y 50 °C, las temperaturas 60 °C y 70 °C resultaron eficaces para alcanzar el contenido de humedad deseado (6% base seca).

A partir de vainas deshidratadas de mezquite se pueden obtener harinas para la elaboración de productos horneados que proporcionen el pardeamiento, color, sabor, aroma y fibra a otros productos (Felker *et al*, 2013).

Para aplicar un proceso de secado en vainas de mezquite es muy importante caracterizar las etapas de madurez de estos frutos. Cerón *et al* (2015) analizaron el impacto de la madurez de la vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) originarias de Hidalgo, México. Evaluaron el grado de madurez de la vaina indicado por el color, contenido nutrimental y características físicas.

Identificaron tres etapas de madurez. Se concluyó que el color de la vaina de mezquite puede definir el estado de madurez y la colecta de la misma. También se encontró que las características de las vainas varían con respecto al estado de madurez.

Rahman *et al* (2007), desarrollaron un modelo bidimensional de difusión de humedad para predecir la variación del contenido de humedad respecto del tiempo y la distribución de la temperatura dentro del modelo de productos alimenticios multidominio. Se verificaron las predicciones del modelo mediante una serie de experimentos utilizando un secador convectivo asistido por una resistencia para calentar el aire de secado. El modelo tuvo un buen acoplamiento con los datos experimentales.

Irudayaraj (2008), estudió la transferencia de humedad en los diversos dominios de la semilla de maíz (pericarpio, germen, endospermo blando) a diferentes temperaturas y humedades relativas en experimentos de sorción. La difusión de humedad aumentó con el incremento de temperatura y humedad relativa. Mientras mayor sea el gradiente de concentración mayor serán los valores de difusividad de humedad del material. Sin embargo entre los diferentes dominios del maíz se encontraron valores de difusividad muy diferentes lo que se atribuye a la conformación y composición física y química del material.

Balmaceda *et al* (2015), estimó experimentalmente los coeficientes de difusión efectivos de agua en semillas de amaranto rehumectadas. Para estimar el coeficiente de difusión se empleó el modelo difusional basado en la solución analítica de la segunda ley de Fick, considerando a la semilla de amaranto como una esfera de radio 0.6 mm. Los valores de los coeficientes de difusión efectivos aumentaron con el incremento de la temperatura. Los resultados obtenidos representan un avance en el campo de la industrialización de harinas, acondicionamiento de las mismas previo al procesamiento.

1.3. Justificación.

El árbol de mezquite (*Prosopis* spp) se distribuye en México una superficie aproximada de 3.5 millones de hectáreas; 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 en Chiapas y en las regiones altas centrales del país. En el estado de Oaxaca encontramos la especie *Prosopis laevigata* (Sauceda *et al*, 2014); distribuida en más de la cuarta parte del territorio del Estado (SAGARPA, 2015).

El mezquite crece en zonas áridas y no áridas en donde la población marginada carece de otras fuentes de alimento como el trigo o maíz (Conaza, 1994). Las vainas que producen presentan un amplio panorama para el desarrollo de alimentos con alto contenido de carbohidratos y proteína (Cruz *et al*, 2012).

El desarrollo de alimentos con alto contenido de carbohidratos y proteína mejoraría el estado nutricional de las personas con desnutrición (Casanueva, 2001) presentes en poblaciones de recursos económicos bajos en donde las vainas de mezquite crecen. Un estudio que caracterice las propiedades físico-químicas de las vainas, un análisis de su microestructura y la implementación de un proceso de secado, permitirán tener información para la implementación de este proceso a una escala mayor.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

- Analizar el proceso de secado de vainas de mezquite a diferentes condiciones.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las vainas de mezquite.
- Analizar la microestructura interna de las vainas de mezquite.
- Establecer y analizar las condiciones de secado para las vainas de mezquite (T° , H.R., Velocidad del aire).
- Analizar las cinéticas de secado obtenidas para las vainas de mezquite.
- Determinar la curva característica de secado de vainas de mezquite.
- Determinar el coeficiente de difusión efectivo en vainas de mezquite.

Capítulo 2 Marco Referencial.

2.1. El árbol de Mezquite.

El mezquite (*Prosopis* spp.) es un árbol o arbusto espinoso, perenne, que llega a medir de 40 cm. hasta 10 m de altura, de acuerdo a la profundidad del suelo. Es una leguminosa que pertenece a la familia botánica de las Mimosáceas. Posee raíces que pueden penetrar a grandes profundidades en busca del agua.

A nivel mundial existen 44 especies del género *Prosopis*, 42 de las cuales se encuentran en el continente americano, distribuidas en dos grandes centros: el norteamericano (mexicano- tejano) y el suramericano (argentino- paraguayo- chileno). El complejo norteamericano, de acuerdo con Rzedowski (1988), cuenta con 9 especies, una con 2 variedades, todas ellas presentes en México y su distribución geográfica es muy amplia. Las especies más comunes son: *Prosopis juliflora*, *Prosopis palmeri* (palo fierro), *Prosopis laevigata*, *Prosopis glandulosa* y *Prosopis pubescens*.

Los estados de la república que destacan por su producción forestal de mezquite son: Sonora, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Zacatecas, Durango, Coahuila y Nuevo León. De menor importancia son los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Chihuahua, Jalisco, Oaxaca, Querétaro y Sinaloa (Ramírez, 2005).

2.1.1. Origen y distribución del mezquite.

El origen de mezquite se ubica en África donde predomina la especie única *Prosopis africana*, se considera que las especies del género *Prosopis* tienen aproximadamente 70 millones de años de antigüedad. Consta de aproximadamente 45 especies distribuidas en las zonas áridas y semiáridas de América, norte de África y suroeste de Asia. 43 especies se pueden encontrar en América en dos grandes centros: el México-Texano y el Argentino-Paraguayo-Chileno (Ramírez, 2005).

2.1.2. La vaina de Mezquite.

La vaina de Mezquite es rica en concentración de carbohidratos y proteína; contiene en promedio de 7-22% de proteína, 30-75% de Carbohidratos, 11-35% de Fibra, 1-6% de Lípidos y 6% de Cenizas (Choge *et al*, 2007).

2.1.3. Estructura de la vaina.

2.1.3.1. Epicarpio.

El epicarpio, constituido principalmente por fibras, presenta un color amarillo o color paja o café-rojizo o plumizo, a veces presenta manchas violetas (Mom, 2012).

2.1.3.2. Mesocarpio.

El mesocarpio carnoso, fibroso o azucarado, es comestible y nutritivo en algunas especies. Está constituido por un parénquima pluriestratificado más o menos desarrollado (Mom, 2012).

2.1.3.3. Endocarpio.

El endocarpio forma una estructura cerrada e indehiscente, de diferentes espesores, y su tamaño guarda una relación directa con el tamaño de las semillas. Está dividido en segmentos inseminados cerrados, en ocasiones difíciles de abrir. En sección transversal, exhibe fibras lignificadas, con un patrón de distribución cruzado (Mom, 2012).

2.1.3.4. Semillas.

Las semillas son ovoides, comprimidas, resistentes, de color marrón. Presentan línea fisural, endospermo rico en galactomananos. Son generalmente ovoides, elípticas, oblongo elípticas, más o menos cuadrangulares o a veces irregulares, duras, comprimidas, color castaño claro, café-amarillentas a rojizas, más o menos brillantes y de textura lisa. La extracción del fruto es difícil (Mom, 2012).

2.2. Secado de alimentos.

La deshidratación o secado de alimentos es una de las operaciones unitarias más utilizadas en la conservación de los mismos. Ya era utilizada en tiempos prehistóricos, pues permitía obtener productos alimenticios con una mayor vida de anaquel. Con el aumento de la población la demanda de alimentos va en aumento, lo que ha provocado que la industria de secado de alimentos obtenga una gran relevancia en el sector alimentario. En el proceso de secado el agua que contiene el alimento es eliminada, en mayor o menor grado, consiguiendo así un mejor grado de conservación, previniendo alteraciones microbianas, reacciones enzimáticas y no enzimáticas y degradación de nutrimentos que afectan la calidad del alimento. A la vez el secado de alimentos logra disminuir los costos de envasado, manejo, almacenamiento y transporte, ya que disminuye el peso del alimento y en algunos casos el volumen (Ibarz *et al*, 2005).

Todos los alimentos contienen agua y la presencia de esta provocará un rápido deterioro debido a cambios biológicos y químicos, generalmente ocurren cuando el contenido de agua es elevado (Troller, 2002).

Cuando un sólido húmedo es sometido a secado por aplicación de calor, dos procesos ocurren de manera simultánea:

- 1) Transferencia de energía (aporte de calor) del ambiente que rodea al sólido para evaporar la humedad de la superficie. La remoción de vapor de agua de la superficie del material, depende entre otros factores de las condiciones externas como temperatura, humedad del aire y el flujo de aire, además del área de contacto del material y la presión.
- 2) Transferencia de humedad del interior del material hacia la superficie del sólido y su subsecuente evaporación en la superficie. El movimiento de la humedad del interior del sólido, es una función de la naturaleza del sólido, la temperatura y el contenido de humedad. En la operación de secado cualquiera de estos procesos puede ser un limitante para la velocidad a la cual se lleva a cabo el secado, a pesar de que ambos procesos ocurren al mismo tiempo durante el secado.

La velocidad a la cual el secado se desarrolla se rige por la velocidad a la cual los procesos anteriores suceden (Mujumdar, 2014). La transferencia de energía puede suceder por convección, conducción o radiación y en algunos casos como una combinación de estos tres efectos (Mujumdar, 2014). Los secadores industriales difieren en cuanto al tipo y diseño. En la mayoría de los casos durante el secado el calor se transfiere a la superficie del sólido húmedo y posteriormente al interior del mismo. Más del 85% de los secadores industriales funcionan por convección de aire caliente o gases de combustión directa como medio de secado (Mujumdar, 2014). El transporte de agua dentro del sólido debe ocurrir por uno o más de los siguientes mecanismos de transferencia de masa (Mujumdar, 2014):

- Difusión del líquido, si el sólido está a una temperatura menor al punto de ebullición del líquido.
- Difusión de vapor, si el líquido se vaporiza dentro del material y se transporta en fase gaseosa.
- Por capilaridad.
- Combinación de los mecanismos anteriores.

La estructura del sólido está sujeta a cambios durante el secado, los mecanismos de transferencia de humedad también pueden cambiar con el tiempo transcurrido de secado (Mujumdar, 2014).

2.2.1. Factores que afectan el secado.

Las variables principales del secado son la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad y dirección del flujo de aire, la forma física del sólido y el método de soporte que se proporciona a sólido durante la operación de secado. Las condiciones de secado externas son esencialmente importantes durante las primeras etapas del secado, cuando el agua libre es removida. En materiales como la cerámica y la madera, donde se produce una contracción considerable; debido a una excesiva evaporación en la superficie se producen gradientes de humedad del interior del material a la superficie del mismo. Lo anterior puede ocasionar un secado excesivo y un encogimiento importante del material, provocando una alta tensión dentro del mismo, causando agrietamiento y deformación. En estos casos la evaporación de la superficie puede ser controlada aplicando/manteniendo una humedad relativa elevada del

aire, mientras se mantiene una velocidad segura de movimiento de humedad interna mediante la transferencia de calor (Mujumdar, 2014).

La evaporación en la superficie es controlada por la difusión de vapor desde la superficie del material al ambiente que lo rodea. Una fina película de aire que está en contacto con la superficie del sólido se desarrolla como consecuencia del perfil de velocidades y de la viscosidad del gas. La transferencia de masa está acompañada de una transferencia de calor, lo que requiere de un análisis simultáneo (Mujumdar, 2014).

Como resultado de la transferencia de calor a un material húmedo, un gradiente de temperatura se produce dentro del material, lo cual produce una migración de la humedad desde el interior del material a la superficie. Lo anterior es explicado por el mecanismo de difusión, y flujo capilar. Es importante considerar este movimiento interno de la humedad. Variables como la velocidad del aire y la temperatura, que normalmente incrementan la velocidad de evaporación de la humedad de la superficie son de menor importancia excepto para incrementar la rapidez de transferencia de calor. El gradiente de temperatura establecido en el sólido también creará un gradiente de presión de vapor, que a su vez dará lugar a la difusión del vapor de humedad a la superficie, esto ocurrirá de manera simultánea con el movimiento de la humedad líquida (Mujumdar, 2014).

2.3. Actividad de agua.

El agua en los alimentos puede encontrarse en forma de agua libre o disponible que participa en las ya mencionadas reacciones y en forma de agua ligada o no disponible. La medida de la cantidad de agua disponible en un alimento corresponde a la actividad de agua, que se define como el cociente entre la presión parcial de vapor de agua contenida en un alimento (P_a) y la presión parcial de vapor de agua pura (P_o) a una temperatura determinada. Es así un parámetro adimensional pues mide la cantidad de agua disponible en el alimento, y por lo tanto también la facilidad o dificultad para las alteraciones de los alimentos. Influye en la estabilidad de los alimentos, ya que es necesaria para que se lleven a cabo reacciones químicas, bioquímicas y para que exista crecimiento microbiano. Así mismo, sus reacciones químicas e interacciones con otras sustancias pueden ser determinantes para que se presenten cambios muy significativos dentro de la elaboración de algunos alimentos. Por último contribuye a la estructura, aspecto y cualidades sensoriales de los alimentos, tales como apariencia, textura y color (Astiasarán, 2003).

Tabla 1. Actividad de agua mínima (a_w), para el crecimiento microbiano y germinación de esporas (Jangam *et al*, 2010).

Microorganismo	Actividad de Agua
<i>Organismos productores de moho en la carne.</i>	0.98
<i>Pseudomonas, esporas de Bacillus cereus.</i>	0.97
<i>B. subtilis, esporas de C. botulinum.</i>	0.95
<i>C. botulinum, Salmonella</i>	0.93
<i>La mayoría de las bacterias.</i>	0.91
<i>La mayoría de las levaduras.</i>	0.88
<i>Aspergillus niger.</i>	0.85
<i>La mayoría de mohos.</i>	0.80
<i>Bacterias halófilas.</i>	0.75
<i>Hongos Xerófilos.</i>	0.65
<i>Levaduras Osmofilas.</i>	0.62

2.3.1. Agua libre.

El agua libre o también llamada agua congelable o agua capilar es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la principal responsable de la actividad del agua (Badui, 2006). Tiene un alto índice de movilidad molecular, que contribuye en las reacciones químicas. (Zhang, 2009).

2.3.2. Agua ligada.

El agua ligada es aquella que está tan fuertemente incorporada en la forma física del material que es prácticamente inmóvil y no está disponible para reaccionar (Zhang, 2009).

2.4. Generalidades del secado.

2.4.1. Determinación del contenido de humedad.

La determinación del contenido de humedad de materiales húmedos aparentemente es simple, sin embargo los resultados obtenidos a menudo no son lo suficientemente exactos, muchos de los materiales pueden sufrir reacciones químicas (oxidación, descomposición,

destilación destructiva y otros) al ser sometidos a calentamiento, y esto a la vez puede llevar al cambio del material. Al mismo tiempo el agua adsorbida debe diferenciarse de la llamada agua de cristalización, lo cual frecuentemente es un problema complejo. Al seleccionar las técnicas de determinación de humedad se debe considerar el grado de exactitud que se desea obtener, el procedimiento, el alcance de la investigación y la complejidad requerida por los instrumentos y equipo a utilizar (Mujumdar, 2014).

Para el proceso de secado por lotes por lo general se expresan los datos obtenidos como el peso total del sólido más agua diferentes tiempos t en horas durante el periodo de secado (Geankoplis, 1998). Con estos valores se puede obtener el contenido de humedad de los productos, el cual es definido como la relación entre la cantidad de agua en los alimentos y la cantidad de sólidos secos (Ibarz *et al*, 2005).

$$W_t = \frac{Wk - W_s}{W_s} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

W_t = Contenido de humedad al tiempo t (g agua/g materia seca).

Wk = Peso del sólido antes del secado (g).

W_s = Peso total del sólido al final del secado (g).

Si se grafica el contenido de humedad obtenido con la ecuación anterior contra el tiempo obtenemos la cinética de secado (**Figura 1**).

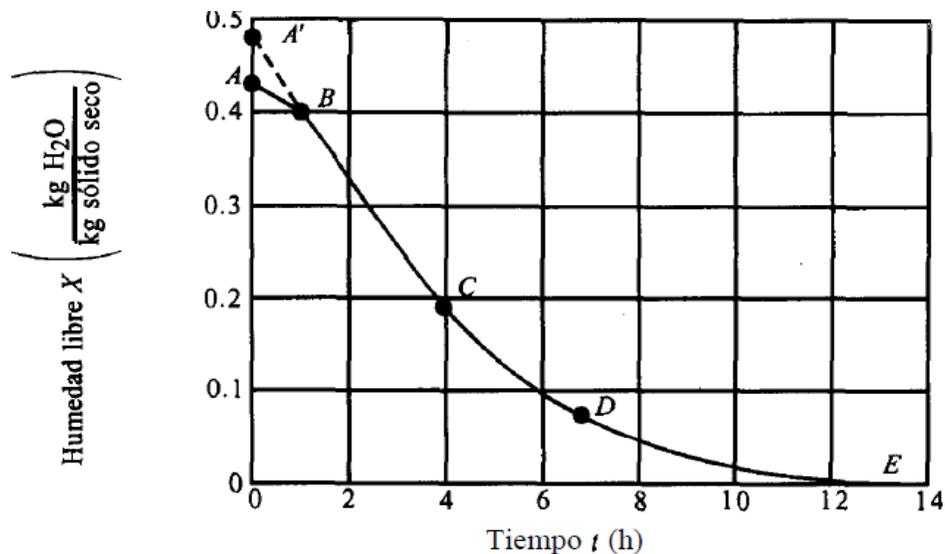


Figura 1. Contenido de humedad en función del tiempo (Geankoplis, 1998).

2.4.2. Mecanismo de secado.

En el proceso de secado de un material se describen una serie de etapas en las que la rapidez de secado juega un papel determinante. En una curva de rapidez de secado (**Figura 2**) los puntos A y A' representan el inicio de secado de un material frío o caliente. El punto B representa la condición de temperatura de equilibrio de la superficie del producto. El tiempo transcurrido para pasar de A o A' a B suele ser bajo, y a menudo se desprecia en los cálculos del tiempo de secado.

El periodo de la curva B-C es conocido como período de rapidez constante de secado, y está asociado a la eliminación del agua no ligada al producto. El período de rapidez constante continúa mientras el agua evaporada en la superficie pueda ser compensada por la que se encuentra en el interior. El período de velocidad decreciente se da cuando la rapidez de secado no se mantiene constante y empieza a disminuir. En este caso, la rapidez de secado está gobernada por el flujo interno del agua y vapor. El punto C representa el inicio del período de velocidad decreciente, pudiéndose dividir este período en dos etapas. La primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen continuamente hasta que la superficie está seca completamente (punto D), mientras que la segunda etapa del período de velocidad de secado decreciente se inicia en el punto D, cuando la superficie está completamente seca, y el plano de evaporación se traslada al interior del sólido. El calor requerido para eliminar la humedad es transferido a través del sólido hasta la superficie de evaporación, y el vapor de agua producido se mueve a través del sólido en la corriente de aire que va hacia la superficie. En ocasiones no existen diferencias marcables entre el primer y segundo período de velocidad decreciente. La cantidad de humedad eliminada en este período puede ser baja, mientras que el tiempo requerido puede ser elevado, ya que la rapidez de secado es baja (Ibarz *et al*, 2005).

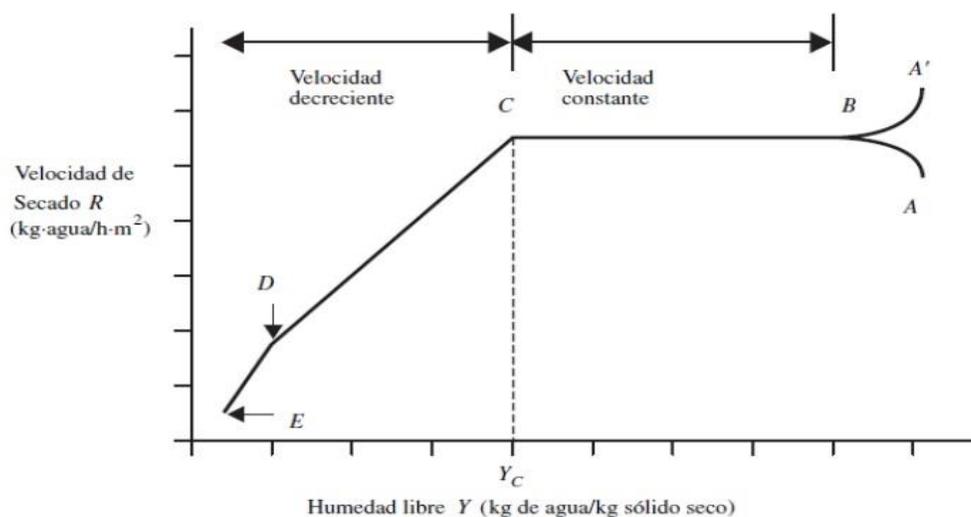


Figura 2. Curva de rapidez de secado (Ibarz *et al*, 2005).

2.4.3. Curva de rapidez de secado.

La curva de rapidez de secado se obtiene a partir de la cinética de secado de contenido de humedad W contra el tiempo t en horas. Se miden las pendientes de las tangentes de la curva, las cuales proporcionan los valores de $\frac{dW}{dt}$ para cada valor de tiempo. Calculamos el valor de dW para cada punto con la siguiente ecuación (Geankoplis, 1998):

$$dW = -\frac{L_s}{A} \frac{dW}{dt} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$$dW = \text{Rapidez de secado} \left(\frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca} * \text{min}} \right).$$

$L_s = \text{kg de sólido seco que se utilizó.}$

$A = \text{Área superficial expuesta al secado en } m^2.$

2.4.4. Curva característica de secado.

Cuando las curvas de rapidez de secado se determinan en un rango de condiciones para un sólido dado, las curvas obtenidas son geoméricamente similares y son simplemente función del grado en que se ha producido el secado. Si estas curvas se normalizan con respecto a la rapidez de secado inicial y el contenido medio de humedad, todas las curvas podrían aproximarse a una curva característica única de una sustancia en particular, esta es llamada la curva característica de rapidez de secado (Mujumdar, 2014).

Si se desea describir el comportamiento de secado de un sólido mediante la curva característica, entonces sus propiedades deben satisfacer los siguientes criterios: 1° El contenido de humedad crítico no varía y es independiente del contenido de humedad inicial y condiciones externas; 2° Todas las curvas de una sustancia específica son geoméricamente similares, de modo que la forma de la curva es única e independiente de las condiciones externas. Estos criterios son restrictivos, y es poco probable que cualquier sólido los satisfaga cuando es sometido a un exhaustivo número de condiciones; sin embargo el concepto es utilizado a menudo para interpolación y predicción del rendimiento de un secador (Mujumdar, 2014).

2.4.5. Contenido de humedad en equilibrio de los materiales.

Aquel que alcanza el material cuando es sometido por un determinado período de tiempo a unas condiciones determinadas de temperatura y humedad relativa. El contenido de humedad en equilibrio es llamado equilibrio higroscópico, el cual se alcanza cuando la presión de vapor

de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor del agua del aire del ambiente (Mejía *et al*, 1995).

El contenido de humedad en equilibrio de los productos agroalimentarios depende principalmente de: La humedad relativa del aire, temperatura del producto que es aproximadamente igual a la temperatura del ambiente, especie o variedad del producto, madurez fisiológica y la historia del producto y el método por el cual se obtuvo el equilibrio. (Mejía *et al*, 1995).

2.4.6. Equilibrio higroscópico.

Los materiales agroalimentarios presentan una naturaleza higroscópica, es decir muestra la capacidad de ganar o perder humedad, dependiendo de las condiciones internas de humedad en relación a la temperatura y humedad del aire que los rodea. Esta característica permite al grano alcanzar un contenido de humedad constante denominada humedad de equilibrio (Muñoz, 1992). El conocimiento del contenido de humedad de equilibrio " W_{eq} " de los granos constituye la base para garantizar un secado adecuado para el almacenamiento seguro (León *et al*, 2007).

2.4.7. Interpretación del contenido de humedad de equilibrio de los materiales.

Una parte significativa de materiales están conformados por una multitud de capilares, micro y macro poros, células y micelas de variadas dimensiones y formas. En estos sitios los potenciales de humedad se determinan mediante la acumulación estructural. Las propiedades de enlace de la humedad de los materiales son afectadas por su acumulación estructural interior. Entonces las características de equilibrio determinadas mediante la medición solo podrán aplicarse a materiales estrictamente idénticos en su estructura al momento de la determinación (Mujumdar, 2014).

El contenido de humedad de equilibrio se alcanza como resultado de la interacción entre el material y el medio ambiente. Cambios en el contenido de humedad de un material son debidos a condiciones como presión y temperatura que ocurren en la superficie de los materiales. Después de un periodo de tiempo suficiente a condiciones constantes un proceso de equilibrio de difusión en el interior del material hasta que se alcanza el contenido de humedad de equilibrio. En el estado de equilibrio existe una distribución de humedad estable dentro del material (Mujumdar, 2014).

2.4.8. Isotermas de sorción y desorción.

Además de predecir el crecimiento microbiano o la estabilidad química de los alimentos, es de vital importancia conocer las isotermas de sorción para propósitos de ingeniería relacionados al secado. El punto final de un proceso de secado está determinado generalmente por el contenido de agua del producto final (Iglesias, 2012).

El contenido de humedad de un sólido húmedo en equilibrio con el aire a una determinada humedad y temperaturas se denomina contenido de humedad en equilibrio (EMC). Una gráfica de EMC a cierta temperatura contra la humedad relativa se denomina isoterma de sorción (Jangam *et al*, 2010).

Una isoterma obtenida de un material que está en contacto con un ambiente con una humedad relativa elevada a cierta temperatura nos da como resultado la isoterma de adsorción. Por el contrario la isoterma obtenida de un material que está en contacto con un ambiente con una humedad relativa baja nos da como resultado la isoterma de desorción. Esta última es de interés en el secado pues el contenido de humedad de los sólidos disminuye de manera progresiva (Jangam *et al*, 2010).

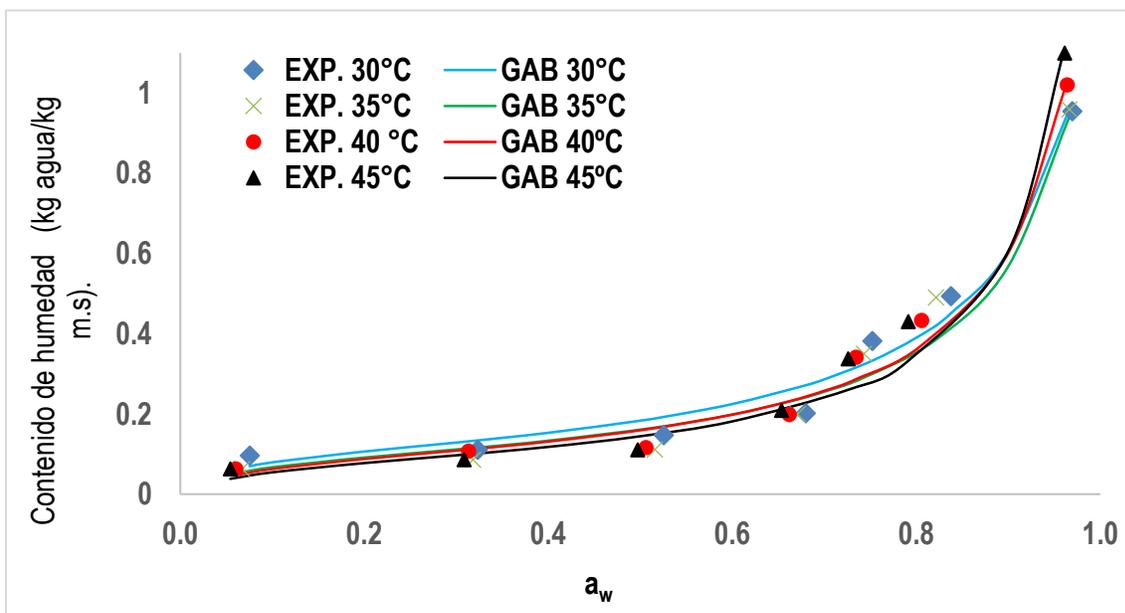


Figura 3. Isoterma de sorción GAB a 30, 35, 40 y 45 °C para polvo de mezquite *Prosopis laevigata* Oaxaca.

2.4.9. Equipo para secado.

Se conocen varios tipos de secadores y métodos de secado, se utilizan comercialmente para eliminar la humedad de una amplia variedad de frutas y verduras. El secado convencional va desde el secado al sol hasta el secado a nivel industrial (León *et al*, 2002). En función de la influencia de la transferencia de materia y de la transmisión de calor, el sistema de deshidratación más eficaz será aquél que mantenga los máximos valores posibles de los gradientes de presión de vapor y de temperatura entre el aire y el interior del producto a deshidratar. Esas condiciones junto con altos valores de los coeficientes de convección en la superficie del producto pueden mantenerse en varios diseños diferentes (Singh *et al*, 2001).

2.4.10. Secadores de bandejas.

El secador de bandejas (**Figura 4**), también llamado secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimentos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad. En un secador de bandejas típico, un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado (Geankoplis, 1998).

Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado. Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador. En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire (Geankoplis, 1998).

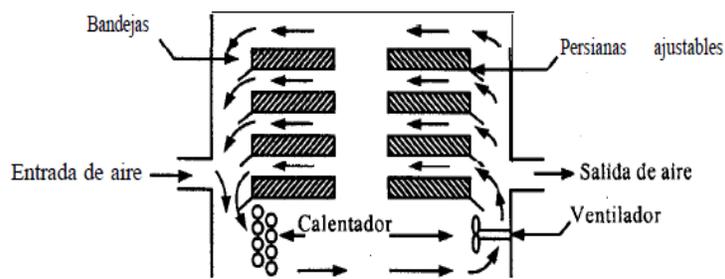


Figura 4. Secador de bandejas o de anaqueles (Geankoplis, 1998).

2.5. Transferencia de calor.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor (Incropera *et al*, 1999).

Se necesita una fuerza motriz para vencer una resistencia con el fin de transferir una propiedad. Para cualquier tipo de procesos de transporte moleculares (movimiento, calor o energía térmica y masa. La característica más notable de los productos alimenticios son sus valores extremadamente bajos de conductividad térmica en comparación con los metales. Esta diferencia en conductividad térmica se debe a diferencia en la abundancia de electrones libres. En los metales, los electrones transmiten la mayor parte de la energía térmica, mientras que en los alimentos en donde el agua es el constituyente principal, la concentración de

electrones libres es bajo y el mecanismo de transferencia implica principalmente la vibración de los átomos y las moléculas. Por lo tanto los buenos conductores eléctricos también son buenos conductores térmicos, a su vez materiales como el vidrio que son buenos aislantes eléctricos son también buenos aislantes térmicos. Otra característica notable es que la conductividad térmica del hielo es cuatro veces mayor a la del agua. Esta diferencia en la conductividad térmica explica en parte la diferencia en las tasas de congelación y descongelación de los tejidos de los alimentos. Durante la congelación, el calor es conducido a través de una capa de hielo, una capa que tiene una conductividad más alta que la de las capas de agua y por lo tanto ofrece poca resistencia al flujo de calor. Durante la descongelación el material congelado se ve rodeado por una capa en continua expansión agua inmóvil, el flujo de calor en a través de esta capa es considerablemente difícil. En esencia el agua actúa como un aislante en comparación con el hielo. En consecuencia el proceso de descongelación en alimentos no fluidos en la naturaleza es más lento que el proceso de congelación (Karel *et al*, 1975).

2.5.1. Transferencia de calor por convección.

Cuando un fluido, sea líquido o gas, entra en contacto con un sólido, tal como la superficie de una pared, tiene lugar un intercambio de calor entre el sólido y el fluido siempre que exista una diferencia de temperaturas entre ambos. Durante el calentamiento o enfriamiento de gases o líquidos, las corrientes de fluido intercambian calor con las superficies sólidas por convección.

La magnitud del movimiento del fluido juega un papel importante en la transmisión de calor por convección. Dependiendo de si el flujo del fluido es inducido artificialmente o no, existen dos tipos de transmisión de calor por convección: forzada y natural. La convección forzada implica el uso de un medio mecánico como una bomba o un ventilador que mueva el fluido. Por el contrario, la convección natural ocurre debido a la diferencia de densidades a su vez debidas a gradientes de temperatura en el sistema. Ambos mecanismos pueden dar lugar a flujo laminar o turbulento, aunque éste último tiene lugar más a menudo en el caso de convección forzada (Singh *et al*, 2001).

2.5.2. Transferencia de calor en secadores de aire.

Durante el proceso de secado se dan tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, sin embargo el efecto que cada uno de estos mecanismos pueda tener es determinado por el tipo de secador utilizado (Earle, 1979).

2.6. Transferencia de masa.

La transferencia de masa es el movimiento que se produce debido a un gradiente de concentraciones; puede producirse de una fase o entre fases y se restringe al desplazamiento

de un constituyente líquido o de un componente de una mezcla. De acuerdo con la ley de Fick, la cual describe matemáticamente el proceso de difusión el proceso de difusión, la cual propone que el flujo de materia de un componente por unidad de área es proporcional al gradiente de su concentración (Singh *et al*, 2001).

$$\frac{\dot{m}_B}{A} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\dot{m}_b =$ Flujo másico del componente B $\left(\frac{kg}{s}\right)$,

$c =$ Concentración del componente B $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ó $\left(\frac{kg-mol}{m^3}\right)$.

$D =$ Coeficiente de difusión $\left(\frac{m^2}{s}\right)$.

$A =$ Área (m^2) .

La difusividad en sólidos es menor que en los líquidos; en líquidos a la vez es menor que en los gases debido a la movilidad de las moléculas. En sólidos los coeficientes de difusión varían entre 10^{-9} y $10^{-5} \frac{cm^2}{s}$. En los gases el intervalo es entre $5 \cdot 10^{-1}$ y $1 \cdot 10^{-1}$ La magnitud de la difusividad de masa son una función de la temperatura y concentración; en el caso de los gases la difusividad de masa es afectada en mayor parte por la presión (Singh *et al*, 2001).

2.6.1. Transferencia de masa por convección.

Cuando en el transporte de un componente participa la convección, el flujo másico del componente será mayor que si este transporte ocurriera exclusivamente por difusión molecular. La transferencia de masa por convección ocurre en líquidos y gases y en el interior de la estructura porosa de un sólido poroso. Las contribuciones relativas de la difusión molecular y de la transferencia de masa por convección dependerán de la magnitud de las corrientes de convección en el interior del líquido o el gas (Singh *et al*, 2001).

El transporte de masa debido a la convección se puede estimar por la siguiente ecuación (Singh *et al*, 1997):

$$\dot{m}_B = \frac{k_{mAM_B}}{R_u T_A} (\rho B1 - \rho B2) \quad (\text{Ecuación 4})$$

La ecuación anterior se utiliza para estimar el flujo másico basado en el gradiente de presión de vapor en la zona de transporte de masa. Cuando la aplicación específica es transporte de masa es vapor de agua en el aire se define de la siguiente manera (Singh *et al*, 2001):

$$\dot{m}_B = \frac{k_{mAM_B \rho}}{0.622 R_u T_A} (W1 - W2) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Existen una serie de variables que merecen destacarse en aquellas situaciones que incluyen la existencia de difusión molecular y transferencia de materia debida a convección forzada: la difusividad D_{AB} , la velocidad del fluido u , la densidad másica del fluido ρ , la viscosidad μ , la dimensión característica d_c , y el coeficiente de transferencia de materia k_m . En caso de que se presentara convección natural pueden incluirse otras variables como la aceleración debido a la gravedad g y la diferencia de densidad másica $\Delta\rho$ (Singh *et al*, 2001).

2.6.2. Difusión en estado estacionario de gases y líquidos a través de sólidos.

La difusividad de un gas o un líquido a través de un sólido; suponiendo que el coeficiente de difusión es independiente de la concentración obtenemos (Singh *et al*, 2001):

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dx} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

D_{AB} = Difusividad del gas A o líquido en un sólido B.

A, c = El subíndice A en \dot{m} y c representan un gas o líquido que se difunde a través de un sólido.

2.6.3. Difusión de la humedad.

Una cantidad importante del agua se elimina de los alimentos mediante su difusión, en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior. Al movimiento del agua líquida le seguirá su evaporación en algún punto en el interior del alimento, pudiendo estudiarse el flujo difusional como si fuera difusión molecular. Así, el flujo de agua es una función del gradiente de la presión de vapor, de la difusividad del vapor en el aire, de la distancia a recorrer y de la temperatura. Además, dado que para evaporar el agua es necesario calor, el proceso supone realmente un transporte simultáneo de materia y calor. La eliminación de la humedad del producto dependerá, en parte, de la transferencia de materia por convección hacia la superficie del producto. Aunque este proceso puede no ser el limitante de la velocidad, no debe olvidarse la importancia de mantener las condiciones límite óptimas para el transporte de la humedad (Singh *et al*, 2001).

2.7. Alimentos multidominio.

Un alimento multidominio es un material alimenticio que se encuentra conformado por más de una consistencia física y químicamente diferentes una de la otra. Un ejemplo clásico es una bola de helado en un cono de galleta, un caramelo con centro líquido, una sopa de tallarines. En estos podemos encontrar un dominio líquido, un dominio suave y un dominio líquido; cada uno con un contenido de humedad diferentes del otro (Labuza, 1998). En el caso de las vainas de mezquite cada uno de los dominios que la conforman (semilla,

endocarpio, mesocarpio y epicarpio) tienen una conformación física y química diferentes, contenido de humedad y actividad de agua distintos de un dominio a otro.

2.7.1. Difusión de la humedad en sistemas multidominio.

El control del contenido de humedad inicial y migración de humedad es fundamental para la calidad y seguridad de los alimentos. Idealmente los fabricantes de alimentos desarrollan productos con contenidos de humedad definidos para producir un producto seguro con una vida de anaquel óptima. Los factores de calidad que los productores deben cuidar son: estabilidad microbiana, propiedades físicas, propiedades sensoriales y las reacciones químicas que conduzcan a la pérdida de vida de anaquel, todos estos factores del contenido de humedad y la actividad de agua de cada dominio en un sistema, un sistema multidominio puede estar en un nivel macromolecular o molecular.

Los sistemas multidominio son dinámicos: La pérdida o ganancia de humedad de una región o componente alimenticio a otra región se producirá de forma continua con el fin de alcanzar el equilibrio termodinámico con los componentes de los alimentos de los alrededores y el medio ambiente. Existen diversos factores que influyen en la velocidad y cantidad de la migración del agua en sistemas multidominio. Dos factores principales son la actividad de agua de equilibrio (termodinámica) y los factores que afectan la tasa de difusión (dinámica de transferencia de masa). Para controlar esta migración, varios principios pueden ser utilizados para inhibir el cambio en la humedad, incluyendo la adición de una capa comestible entre los dominios, cambiando la actividad del agua de los ingredientes de los alimentos, modificar la difusividad efectiva del agua en los alimentos y cambiar la viscosidad (Labuza, 1998).

2.7.2. Importancia del control de humedad para la estabilidad en alimentos multidominio.

Los cambios en el contenido de humedad de un sistema multidominio de un alimento, puede afectar su composición física y química, su seguridad y vida de anaquel. Muchos cambios físicos y químicos resultantes de la migración de la humedad se pueden relacionar con la transición vítrea (Labuza, 1998).

Regiones multidominio pueden existir en alimentos sólidos, ya sea en un estado cristalino termodinámicamente estable o en un estado amorfo, que no se encuentra en equilibrio verdadero. Las regiones que están en el estado amorfo pueden estar en un estado gomoso o vítreo. Los materiales amorfos presentan una propiedad llamada temperatura de transición vítrea. Cuando el material cambia desde el estado vítreo al estado gomoso o viceversa existen cambios en las propiedades termodinámicas, movilidad molecular, las propiedades de constante dieléctrica y mecánica. Esta transición está influenciada por la plastificación por el agua u otros ingredientes, el peso molecular de los ingredientes y la cantidad y tipo de

interacciones de unión. Por lo tanto, si una región multidominio gana o pierde humedad, esta puede moverse entre los estados gomoso y vítreo (Labuza, 1998).

2.8. Diseño de secadores.

El ingeniero involucrado con el diseño del diseño de un secador tiene que elegir las condiciones que permitan obtener las propiedades del producto a ser procesado. Las características de rendimiento o sistemas alternativos también deben de evaluarse antes de la elección final del secador. Siempre son necesarias pruebas a pequeña escala para determinar las características de secado del material para predecir el comportamiento del material a procesar dentro de la unidad de secado (Mujumdar, 2014).

En particular, el proceso de diseño envuelve principalmente la optimización de parámetros y metodología. Sin embargo la experiencia empírica siempre tiene una influencia mayor a todo. A pesar de que el modelado del proceso de secado está bien desarrollado, con una comprensión adecuada del proceso en sí, la mayoría de los modelos incorporan una lista larga de propiedades termo físicas y coeficientes de transporte, los cuales en la mayoría de los casos son conocidos de manera poco precisa, produciendo resultados inexactos o erróneos en la aplicación industrial a la mayor escala (Kiranoudis *et al*, 1997).

Para la estimación del tamaño del secador se tiene el siguiente método basado en los datos obtenidos de la operación de secadores industriales. Para secadores por convección, la tasa de transferencia de calor (kcal/h) está dada por (Mujumdar, 2014):

$$q = (ha)(V)(t - t_m), \text{ para secadores tipo batch} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$q = (ha)(V)(t - t_m)l_m, \text{ para secadores continuos} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$q = UA(t_k - t_m), \text{ para secadores por conducción} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En esta ecuación, t_m es la temperatura del producto (k); t es la temperatura de entrada (k); $(t - t_m)l_m$ es la media logarítmica (k) de las diferencias de temperaturas entre el aire caliente y el producto en la entrada y salida, respectivamente; ha es el coeficiente volumétrico de transferencia de calor (kcal/s K m³); U es coeficiente promedio de transferencia de calor (kcal/s K m²); A es el área de calentamiento que está en contacto con el producto (m²); y t_k es la temperatura de la fuente de calor (K) (Mujumdar, 2014).

En el ámbito del diseño de secadores; los esfuerzos están dirigidos a la determinación de la configuración adecuada del equipo, por ejemplo: el número de líneas de procesamiento, bandejas, charolas, determinación del tamaño de línea de proceso y las condiciones de operación dentro de cada equipo. Para el desarrollo de un modelo de secador es necesario (Kiranoudis *et al*, 1997):

- 1) Conocer los balances de masa y calor en dos niveles; el compartimiento del producto y dentro del secador en sí. Para el cálculo de otras variables del proceso es necesario conocer los balances de masa y energía en el secador.
- 2) Las condiciones óptimas pueden ser conocidas mediante la máxima capacidad de producción en el secador que satisfagan las especificaciones finales de un producto de calidad.
- 3) Determinar la proporción de recirculación del aire que permita mejorar la eficiencia de energía durante el proceso.
- 4) Determinar el área total de bandejas requeridas para la rapidez de producción especificada, estos datos se obtienen experimentalmente en donde se obtiene el tiempo necesario de secado para un contenido de humedad inicial y final, así como la carga del material necesario.

Capítulo 3 Metodología.

3.1. Diseño experimental.

Este trabajo de investigación está constituido por varias etapas, las cuales se resumen en la **Figura 5**. Una vez identificados los sitios de muestreo se procedió a recolectar el fruto en diferentes meses de 2016-2017.

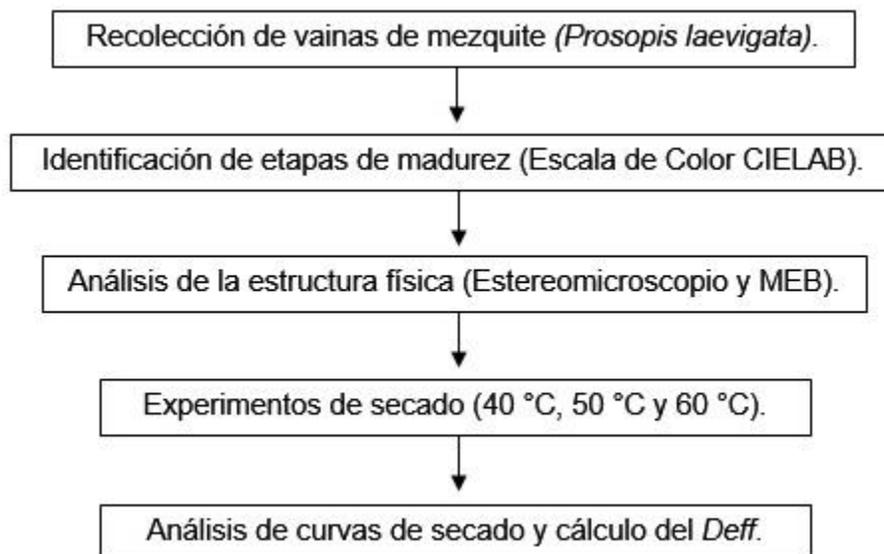


Figura 5. Etapas de la experimentación.

Con la finalidad de realizar nuestros experimentos se diseñó el procedimiento experimental en el cual se varía el nivel de temperatura, pues es el criterio o variable más importante a analizar. La **Tabla 2** muestra el diseño de experimentos y las variables respuesta de mayor interés para el objetivo de este trabajo.

Tabla 2. Diseño experimental secado (todo por triplicado).

Factores controlables			Variables Respuesta		
Vel. aire (m/s)	H.R. (%)	Temp. (°C)	Cont. de humedad final (g agua/g materia seca).	Coefficiente de difusión efectivo (m ² /s)	Tiempo de secado (min)
2.6	10	40			
2.6	10	50			
2.6	10	60			

3.2. Materiales.

Se recolectaron vainas de mezquite de la especie *Prosopis laevigata* (**Figura 6**) (La especie fue identificada por personal del Herbario del CIIDIR Oaxaca), entre los meses de Abril y Agosto de 2016 y 2017, en Oaxaca y Durango. Se almacenaron en un lugar fresco y seco en costales de plástico durante 3 días antes de su uso.



Figura 6. Vainas de mezquite especie *Prosopis laevigata*.

3.3. Recolección de las vainas.

Las vainas fueron recolectadas de manera aleatoria entre los meses de abril y agosto del 2016 y 2017 en las comunidades de Santiago Suchilquitongo, Cuicatlán y Unión Zapata del estado de Oaxaca y en el municipio de Cuencamé, Durango, México. Las vainas fueron almacenadas por 3 días en costales de plástico a temperatura ambiente en un lugar seco. La especie de mezquite (*Prosopis laevigata*) a utilizada en este estudio crece de manera abundante en Oaxaca en las diversas regiones del estado presentando una alta área de distribución.

3.4. Limpieza.

Las vainas se limpiaran con la ayuda de un cepillo, con agua clorada y jabón, retirando los insectos y residuos de suciedad de las mismas.

3.5. Selección de vainas de mezquite.

Se seleccionarán las vainas que no presenten deterioro, ataque por hongos o insectos; las vainas que presentaron estos problemas no fueron utilizadas para el estudio. (**Figura 7**). Se buscó a la vez que presenten una morfología similar.



Figura 7. Vainas con daño por insectos y hongos.

3.6. Determinación del estado de madurez.

Las vainas de mezquite fueron clasificadas de acuerdo con el estado de madurez en que se encontraban al momento de la recolección; mediante cambios en el color utilizando los parámetros CIELAB, utilizando un espectrofotómetro manual marca HunterLab Modelo E-Z; se molieron las vainas y fueron colocadas en recipientes de plástico de color blanco en donde se realizaron tres repeticiones de cada medición con el espectrofotómetro. Las coordenadas de color CIELAB proporcionan los siguientes parámetros: L* luminosidad del material, a* coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde) y b* coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul) (Artigas *et al*, 2002).

3.7. Cuantificación de azúcares.

Se llevó a cabo la cuantificación de los azúcares siguiendo el método volumétrico de Lane-Eynon para determinar azúcares reductores y totales en alimentos (NMX-F-312-1978). Se titularon las disoluciones A (50 ml) y B (50 ml) de sulfato de cobre neutralizados con 10 ml de hidróxido de sodio. Posteriormente se agregó 1 ml de azul de metileno. La titulación se completó cuando se alcanzó la decoloración del indicador. Los resultados fueron expresados en % de azúcares reductores directos. Esta medición fue realizada por triplicado.

3.8. Determinación del contenido de humedad.

Se determinó el contenido de humedad de las vainas pues este varía de acuerdo con el estado de madurez, utilizando el método descrito en la norma NMX-F-083-1986. Se pesó una cantidad de muestra en una cápsula previamente acondicionada para estar en peso constante. Se colocó la muestra y cápsula en la estufa marca VWR Scientific modelo 1410 a una temperatura de 105 °C. Se pesó la muestra en una balanza marca Denver Instrument con una sensibilidad de 0.1 mg para una carga máxima de 110 g, hasta alcanzar el peso constante, esta medición se realizó por triplicado. Para la determinación del contenido de humedad en base seca (g agua/g materia seca) se utilizó la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso Final}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

3.9. Análisis de características físicas de las vainas.

El análisis de la estructura interna y externa de las vainas se llevó a cabo mediante el uso de un estereomicroscopio y un microscopio electrónico de barrido marca JEOL con una resolución espacial de 1.2 nm, haz iónico focalizado y cámara digital. Se introdujeron 6 muestras de vainas cortadas de manera transversal sobre placas de grafito, únicamente de la etapa 3 de madurez. Se colocaron en una platina y se introdujeron a la cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido. Se utilizaron dos tipos de detectores: Detector de electrones secundarios tipo E-T (Everhart-Thornley) y el Detector de electrones retro

dispersados. Se ocupó un rango de magnificación de 50x a 2500 x para los dos detectores en las 6 muestras de vainas. Esta medición fue realizada en 6 vainas con tres repeticiones por cada observación.

3.10. Secado.

Las vainas se cortaron en trozos de 3 centímetros y se colocaron sobre mallas de plástico (Figura 8).



Figura 8. Vainas acondicionadas sobre mallas de plástico previo al secado.

Para el secado se utilizó un secador de bandejas de metal tipo túnel con número de patente 304462. El aire de secado se calentó mediante las resistencias eléctricas instaladas en el túnel, controlando la temperatura mediante un controlador proporcional integral diferencial (PID), el secador cuenta también con un sistema integrado Field Point para la medición en tiempo real de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire de secado (Figura 9).

Para el registro de datos se utilizó el software National Instrument FP-1000, el cual proporcionó un informe en tiempo real de condiciones de los sensores integrados en el secador.

La temperatura de la superficie del material se monitoreó en cuatro vainas, mediante termopares tipo J conectados a un Logger Vaisala Veriteq SP 1700, el cual mandó la información en tiempo real al software Veriteq Spectrum.

El secador cuenta con un soporte que sostiene las bandejas de metal. Sobre las bandejas de metal se colocaron las mallas de plástico con las vainas previamente preparadas. Las muestras se colocaron sobre las bandejas del secador, cada muestra se colocó de forma que la superficie de material esté en contacto con el aire de secado.

Las vainas de Oaxaca en etapa 3 fueron secadas a tres temperaturas diferentes (40°, 50 °C y 60 °C) y las vainas de Durango en etapa 3 fueron secadas a 60 °C, para todos los experimentos

se manejaron condiciones de humedad relativa de 10% y velocidad del aire de 2.6 m/s; se obtuvieron las cinéticas de secado.

Se utilizó una balanza Denver Instrument con una sensibilidad de 0.1 mg para el registro del cambio de peso de las muestras. Se pesaron durante la primera hora cada 10 minutos, cada 20 minutos durante la segunda hora, cada 30 minutos la tercera hora y cada hora posteriormente; o hasta alcanzar el peso constante.

Para la humidificación del aire se utilizó un generador de vapor modelo TV/G2F Anghinetti SRL, al cual se proporcionó agua purificada como alimentación.



Figura 9. Secador de bandejas tipo túnel con número de patente 304462.

Para el almacenamiento de las vainas secadas; se utilizaron bolsas de polietileno con cierre hermético. Posteriormente las vainas fueron puestas en un desecador acondicionado con gel de sílice.

3.11. Cálculo de la curva característica de secado.

A continuación se describe el método por el cual se calculó la curva característica, para esto se utilizaron los datos experimentales de secado (Capítulo 4). Este método tiene como base la identificación de periodos localizados en las curvas de rapidez de secado experimentales (Jannot *et al*, 2004).

Para utilizar el método de la curva característica se normalizaron las cinéticas de secado experimentales (**consulte resultados Figura 23**). El contenido de humedad reducido (W_r) se calculó con la Ecuación 11, en donde W es el contenido de humedad en el tiempo t , W_{eq} es el contenido de humedad de equilibrio al nivel de temperatura de cada experimento, W_c es el contenido de humedad crítico considerado como el contenido de humedad inicial del material (Jannot *et al*, 2004).

$$W_r = \frac{W - W_{eq}}{W_c - W_{eq}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

La rapidez de secado para cada valor de las cinéticas normalizadas se calculó mediante la ecuación polinómica de orden 6 del contenido de humedad en función del tiempo de secado. Para el cálculo de la rapidez de secado reducida (dW_r) los valores de rapidez de secado (dW) se dividieron entre la rapidez de secado de referencia (dW_{ref}) considerada como el valor máximo de rapidez de secado de cada experimento (Jannot *et al*, 2004).

$$dW_r = \frac{dW}{dW_r} = \left[-\frac{dW}{dt} \right]_r = f(W_r) \quad (\text{Ecuación 12})$$

De acuerdo con la Ecuación 14, la rapidez de secado reducida dW_r es una función del contenido de humedad W_r reducido, por lo que se derivó una ecuación para describir la cinética completa usando las siguientes condiciones:

$$f(W_r) = 0 \text{ si } W_r = 0 \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$0 < f(W_r) < 1 \text{ si } 0 < W_r < 1 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$f(W_r) = 1 \text{ si } W_r = 1 \quad (\text{Ecuación 15})$$

En las curvas de contenido de humedad reducido contra rapidez de secado reducido se identificaron 3 periodos del secado (**consulte resultados Figura 24**), los periodos 1 y 3 del secado se despreciaron pues su duración es muy corta y representan contenidos de humedad muy bajos. Estos valores de transición entre periodos fueron identificados gráficamente para todos los experimentos. El periodo de secado 2 se representó como una línea recta que va desde W_r de 1 hasta W_r de 0.001 La deducción del modelo lineal se presenta a continuación (Jannot *et al*, 2004).

Utilizando la Ecuación 12 se obtuvo una expresión de contenido de humedad en función del tiempo de secado. Se despejó esta ecuación y se sustituyó la función del contenido de humedad para el periodo 2 de secado (lineal) de W_r de 1 hasta W_r de 0.001 y se obtuvo la siguiente ecuación.

$$dW = dW_{ref}(c * W_r + d) \quad (\text{Ecuación 16})$$

La rapidez de secado dW se considera como la variación del contenido de humedad respecto del tiempo, entonces se sustituyó en la ecuación y se insertó la expresión que define a W_r .

$$-\frac{dW}{dt} = dW_{ref} \left[c \left(\frac{W - W_{eq}}{W_c - W_{eq}} \right) + d \right] \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$-\frac{dW}{dt} = \frac{C_1 * dW_{ref}}{W_c - W_{eq}} \left[(W - W_{eq}) + \frac{d}{c} * (W_c - W_{eq}) \right] \quad (\text{Ecuación 18})$$

Por medio del método de variables separables se calculó la constante de integración C_1 con las condiciones límites mostradas a continuación.

$$t = 0 \quad W_r = W_{r0}=1$$

$$W = C_1 e^{\frac{-c * W_{ref} * t}{W_c - W_{eq}}} + W_{eq} - \frac{d}{c} (W_c - W_{eq}) \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$C_1 = W_c - W_{eq} + \left(1 + \frac{d}{c}\right) \quad (\text{Ecuación 20})$$

Sustituyendo la Ecuación 20 en la Ecuación 19, se obtuvo una función del contenido de humedad dependiente del tiempo (Ecuación 21)

$$W = W_{eq} + (W_c - W_{eq}) \left[\left(1 + \frac{d}{c}\right) e^{\frac{-c * W_{ref} * t}{W_c - W_{eq}}} - \frac{d}{c} \right] \quad (\text{Ecuación 21})$$

Esta ecuación lineal se puede predecir las cinéticas de secado para las vainas de la especie de Mezquite de *Prosopis laevigata*, considerando los parámetros de humedad relativa y velocidad del aire utilizados.

Los coeficientes c y d se calcularon minimizando la suma de los errores cuadráticos mediante la herramienta Solver de *Microsoft Excel*, utilizando la siguiente ecuación.

$$SE_i = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{W - W_{cc}}{W} \right)^2 \right] \quad (\text{Ecuación 22})$$

En donde n es el número de registros en la cinética de secado, W es el contenido de humedad experimental y W_{cc} los datos del modelo de curva característica.

3.12. Cálculo del coeficiente de difusión efectivo.

3.12.1. Difusión en estado no estacionario: cilindro sólido.

En este trabajo se utilizaron los diagramas de difusión (**Figura 10**) publicados por Treybal y Bimbenet, en estos diagramas se encuentra en el eje X los valores del número de Fourier (F_0) y en el eje Y el contenido de humedad adimensional (E). La nomenclatura de los diagramas utiliza E sin embargo nosotros utilizaremos el término W_r . El número de Fourier es igual a $F_0 = \frac{Dt}{r^2}$, por lo cual una vez encontrado el contenido de humedad adimensional procedemos a tocar la línea correspondiente a la geometría cilíndrica lo que nos permitiría obtener el valor del número de Fourier en el eje X . Una vez encontrando F_0 procedemos a despejar el coeficiente de difusión de dicha expresión. Las curvas de secado experimentales se

normalizaron las para obtener el valor de W_r . Para la utilización de los diagramas de difusión se tomaron las siguientes consideraciones (Treybal, 1988) (Bimbenet, 2002).

1. No hay resistencia a la difusión en el fluido que rodea el sólido.
2. La cantidad de dicho fluido es lo suficiente grande para que su concentración no cambie en el tiempo.
3. El fluido se está reemplazando continuamente.
4. El material no sufre encogimiento.

$$W_r = \frac{W_\theta - W_{eq}}{W_0 - W_{eq}} f\left(\frac{D\theta}{a^2}\right) \quad (\text{Ecuación 23})$$

En donde:

W_r = Contenido de humedad adimensional.

W_θ = Contenido de humedad al tiempo t .

W_0 = Contenido de humedad inicial.

W_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio.

$W_\theta - W_{eq}$ es una medida de la cantidad de humedad eliminada a un tiempo t del secado; mientras que $W_0 - W_{eq}$ es la medida de la cantidad de humedad que aún no se ha eliminado.

Sustituyendo los valores de W_r de las cinéticas experimentales de secado normalizadas en el eje y (Er) de las cartas de difusión contra el eje x encontramos el valor de la función $\left(\frac{D\theta}{a^2}\right)$. El valor de r es el radio del cilindro en metros, por último t es el tiempo de secado en segundos considerado para W_r . Se despejó D para obtener el valor del coeficiente de difusión efectivo. Los coeficientes de difusión efectivo fueron calculados al inicio de cada experimento de secado (40 °, 50 ° y 60 °C); posteriormente cada hora; se obtuvo el promedio global durante todo el proceso y se presentan en los resultados para cada temperatura.

$$D = \left(\frac{\left(\text{función } \frac{D\theta}{a^2} \right) r^2}{t} \right) \quad (\text{Ecuación 24})$$

D = Coeficiente de difusión efectivo.

$\frac{D\theta}{a^2}$ = Valor de la función obtenido del diagrama de difusividad.

r = Radio del cilindro en metros.

t = Tiempo en segundos.

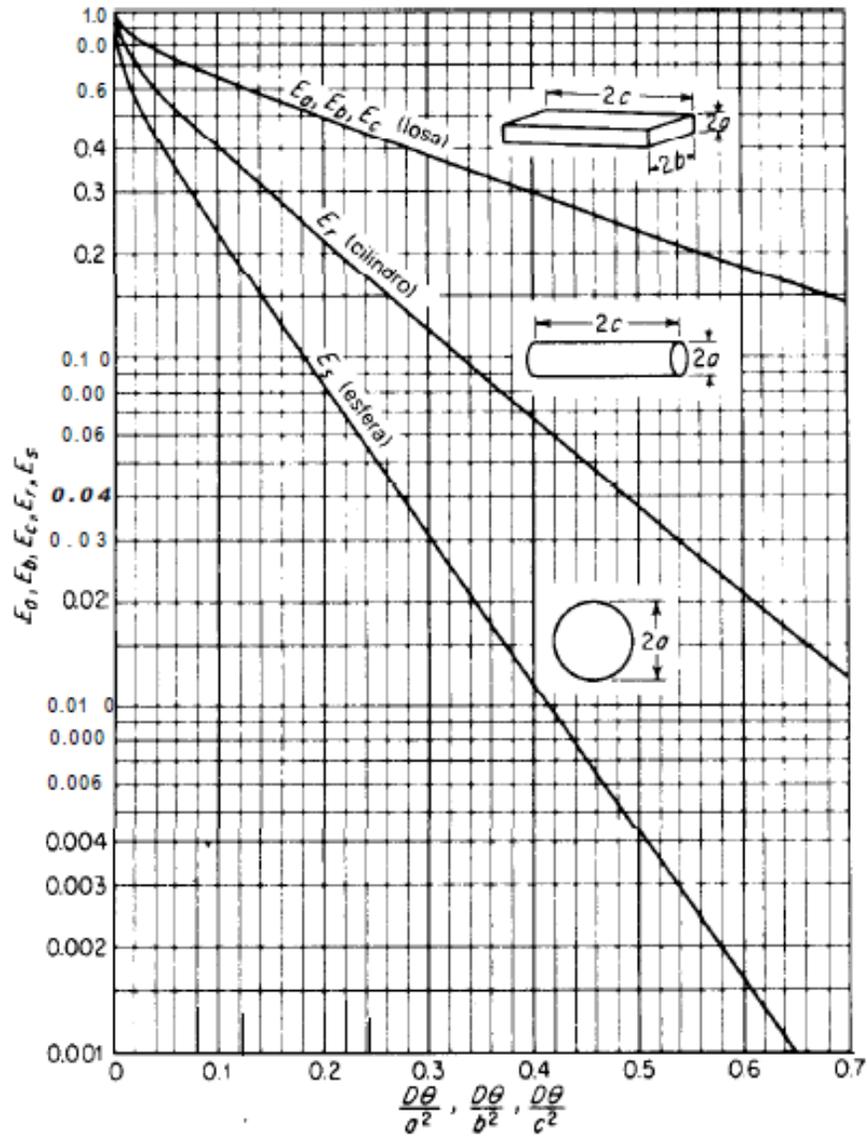


Figura 10. Cartas de difusividad en estado no estacionario para distintas geometrías (Treybal, 1988).

Capítulo 4 Análisis y Discusión de resultados.

4.1. Etapas de madurez.

Las vainas recolectadas mostraron diferentes tonalidades de color, estos cambios iban acompañados de variaciones en el sabor y características físicas. Dependiendo del color se puede determinar si las vainas están listas para ser procesadas. Las vainas verdes tienen un sabor amargo, mientras que las vainas recolectadas en los últimos meses de fructificación tienen un sabor dulce, lo cual es consistente en la mayoría de los frutos. En la medición del color de las vainas recolectadas se definieron tres estadios de madurez (**Tabla 3**). La etapa 1 tiene una coloración verde. En la etapa 2 los parámetros indican que las vainas son más luminosas, tienden a tener una coloración rojiza, y a incrementar el color amarillo. En la etapa 3 los cambios de color indican un aumento en la luminosidad comparado con las etapas anteriores, se sigue observando una coloración rojiza y amarilla, pero en menor intensidad respecto a la etapa 2.

Tabla 3. Parámetros de color CIELAB de vainas de mezquite en diferentes etapas de madurez (*Prosopis laevigata*).

Parámetros	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Luminosidad (L*)	70.75 ± 0.6632	71.46 ± 0.8423	72.47 ± 0.1986 73.87 ± 0.5754
Cloración Rojo-Verde (a*)	-45.84 ± 0.1567	8.68 ± 0.3214	2.13 ± 0.0929 3.66 ± 0.1345
Coloración Amarillo-Azul (b*)	64.78 ± 0.4892	71.13 ± 0.5919	26.08 ± 0.1537 26.4 ± 0.2598

4.2. Contenido de azúcares.

El contenido de azúcares (**Tabla 4**) varía en las tres etapas de madurez y tiene un efecto sobre el secado y posterior granulación de las vainas de mezquite. Se observó que las vainas de Durango poseen un contenido de azúcares mayor a las vainas de Oaxaca.

Tabla 4. Contenido de azúcares de vainas de mezquite en los 3 estados de madurez.

100 g Vainas Contienen	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3 (Oaxaca)	Etapa 3 (Durango)
Azúcares (g)	6.55 ± 0.0680	8.15 ± 0.3552	7.42 ± 0.1305	14.42 ± 0.1178

4.3. Características físicas.

4.3.1. Semillas.

Las semillas son la estructura interna de las vainas, se encuentran contenidas dentro del endocarpio, su consistencia es rígida, difíciles de extraer, tienen forma elíptica con bordes ovalados, superficie lisa y homogénea, sin agujeros, ni acumulación de otros componentes en la superficie. Tienen un color marrón brillante.



Figura 11. Toma longitudinal de las semillas.

Se muestran a continuación imágenes obtenidas por MEB, se seleccionaron las que presentaran mejor calidad y mostraran con detalle la estructura interna de las vainas.

La **Figura 12 a)** magnificación 33x, muestra un corte transversal de la semilla, se aprecia el tegumento que constituye la capa más externa con una superficie rugosa y con grietas a causa del estrés por el corte transversal. El endospermo está dividido en diferentes secciones, cada una con grosor uniforme. También se observa el embrión en la parte central, y la semilla muestra un espesor de 2.5 mm.

La **Figura 12 b)** magnificación 33x, muestra la superficie del tegumento de la semilla, presentando una conformación homogénea, lisa y sin poros aparentes, lo anterior dificulta la salida de agua de la semilla al exterior de la vaina y constituye un mecanismo de conservación de la semilla para su posterior eclosión.

La **Figura 12 c)** magnificación 33x, muestra la parte posterior del tegumento que sigue la conformación anteriormente mencionada, así mismo se observa la plúmula que forma parte del embrión. La **Figura 12 d)** magnificación 30x, muestra la separación existente entre la semilla y el endocarpio.

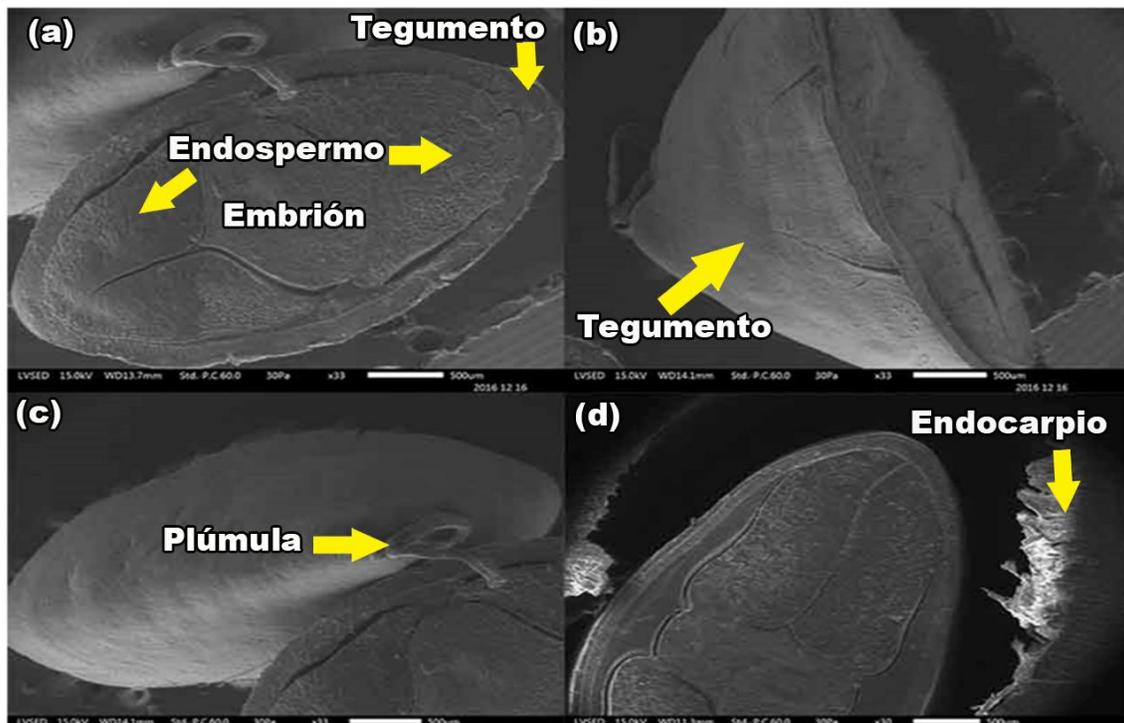


Figura 12. Corte transversal de la semilla.

4.3.2. Endocarpio.

El endocarpio La **Figura 13** muestra una imagen longitudinal del endocarpio de las vainas obtenida mediante estereomicroscopio, se puede observar su conformación sólida y fibrosa.



Figura 13. Corte longitudinal del endocarpio.

La **Figura 14 a)** magnificación 30x, se muestra el grosor del endocarpio, mide aproximadamente 0.1 mm. En la **Figura 14 b)** magnificación 900x, se observa la superficie de la de la cara exterior del endocarpio; tiene una conformación fibrosa entrelazada, carece de poros, actúa como una barrera para la transferencia de masa del interior al exterior de la vaina.

En la **Figura 14 c)** magnificación 1000x, se observa la cara interior del endocarpio, esta presenta una superficie heterogénea, fibrosa y tortuosa. En la **Figura 14 d)** magnificación 1300x, nuevamente se muestra una toma de la superficie del endocarpio.

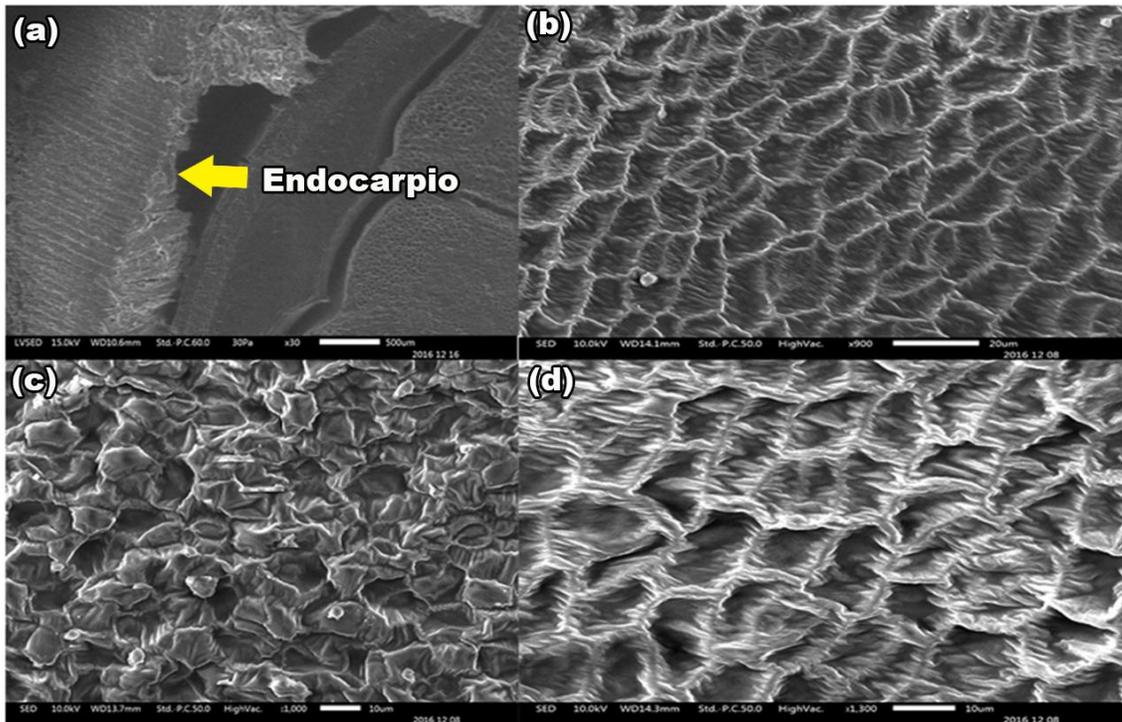


Figura 14. Corte transversal del endocarpio.

4.3.3. Mesocarpio.

El mesocarpio representa la estructura más compleja de las vainas de mezquite. Este dominio es rico en carbohidratos y es de naturaleza altamente higroscópica. Se encuentra fuertemente adherido al endocarpio y epicarpio, lo cual dificulta su extracción. Tiene un color amarillo (**Figura 15**).



Figura 15. Corte longitudinal de vaina de mezquite.

La **Figura 16 a)** magnificación 90x, muestra una sección del mesocarpio adherida a las paredes del endocarpio, esta presenta una conformación heterogénea, tortuosa y gomosa. La **Figura 16 b)** magnificación 200x presenta una sección del mesocarpio unida a la capa interior del epicarpio, tiene una estructura irregular, tortuosa fuertemente adherida al epicarpio. Las **Figuras 16 c)** magnificación 35x y **d)** magnificación 37x, muestran las secciones cavernosas del mesocarpio. El mesocarpio tiene un grosor aproximado de 5 mm siendo la sección de mayor tamaño en las vainas.

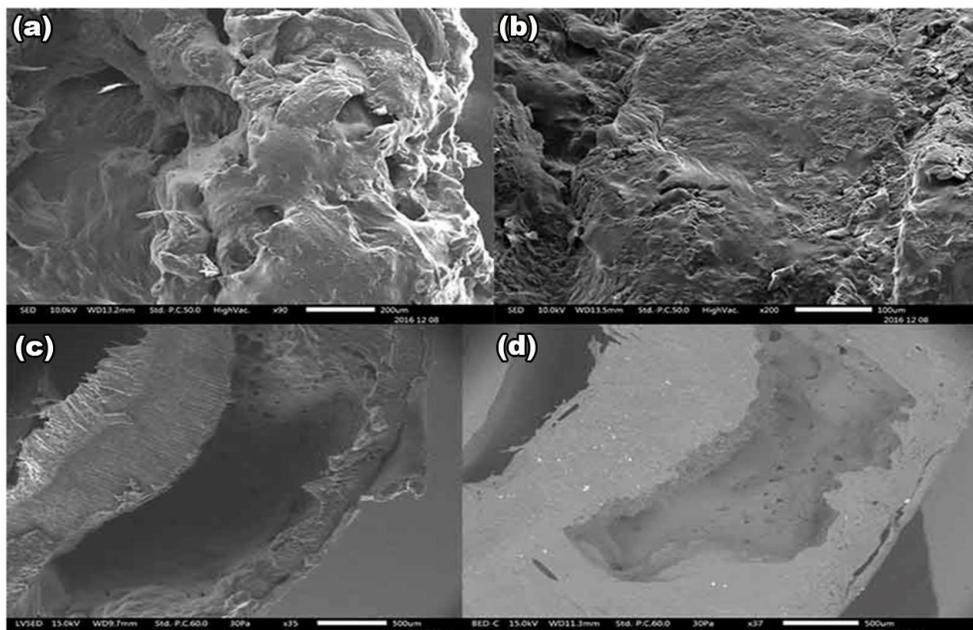


Figura 16. Corte transversal del mesocarpio.

4.3.4. Epicarpio.

El epicarpio es la estructura exterior que recubre la vaina, está constituida principalmente por lignina (Mom, 2012). La **Figura 17 a)** magnificación 270x, muestra la superficie del epicarpio, esta es rugosa e irregular. Tiene un grosor aproximado de 0.1 mm. La **Figura 17 b)** magnificación 2000x, presenta una ampliación del corte transversal del epicarpio en donde se denota la tortuosidad interior similar a las estructuras antes mencionadas.

La **Figura 7 c)** magnificación 90x, muestra nuevamente la superficie del epicarpio, se observan estomas, en plantas estas estructuras son responsables del transporte de agua del exterior al interior (Raven, P *et al*, 1992). La **Figura 17 d)** magnificación 430x, presenta una ampliación de una estoma, tiene una medida aproximada de 0.005 mm de ancho por 0.025 mm de altura, son la única salida aparente para la eliminación de la humedad durante el proceso de secado.

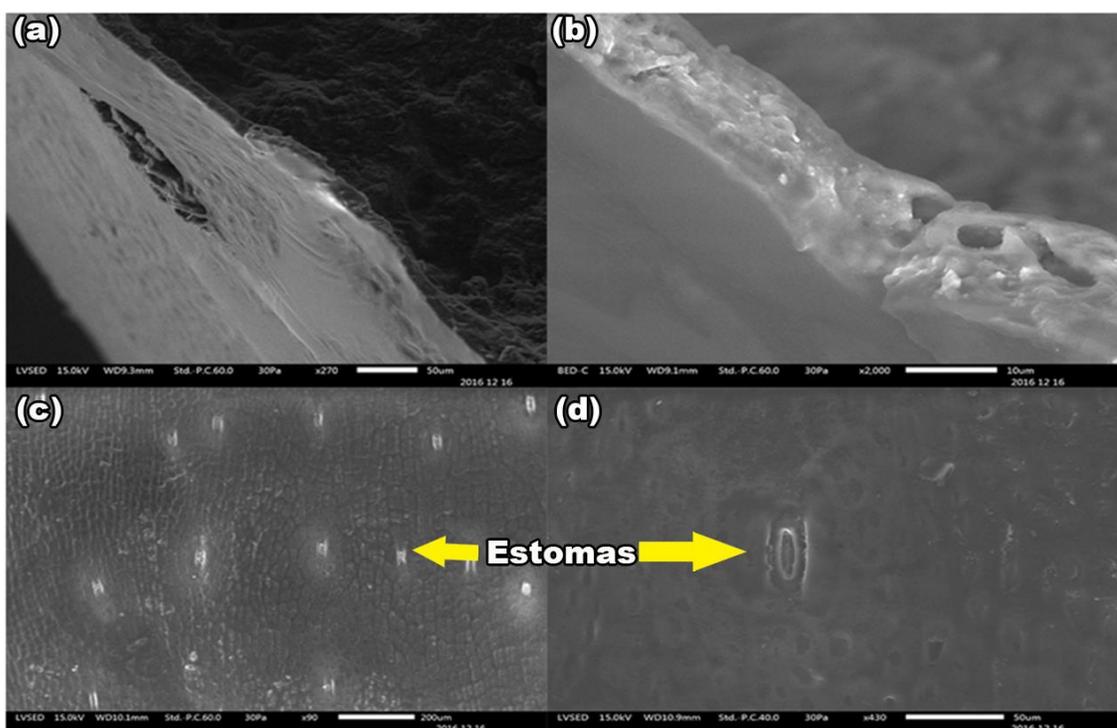


Figura 17. Corte transversal del epicarpio.

4.4. Contenido de humedad.

El contenido de humedad de las vainas depende del estado de madurez. La etapa 1 presenta un contenido de humedad inicial promedio de 3.08 g agua/g materia seca, la etapa 2 presenta un contenido de humedad inicial promedio de 1.01 g agua/g materia seca, y la etapa 3 presenta un contenido de humedad inicial promedio de 0.21 g agua/g materia seca para las vainas de Oaxaca y las vainas de Durango presenta un contenido de humedad de 0.18 g

agua/g materia seca. Las vainas en etapa 1 y etapa 2 no fueron utilizadas ya que son etapas de madurez prematuras no aptas para el secado.

4.5. Experimentos de secado.

Las vainas de Oaxaca secadas a 40°C alcanzaron un contenido de humedad (**W**) de equilibrio de 0.16 g agua/g materia seca $\pm 1.94 \times 10^{-3}$, en un lapso de 200 minutos, a 50 °C las vainas alcanzaron un contenido de humedad (**W**) de equilibrio de 0.15 g agua/g materia seca $\pm 1.72 \times 10^{-3}$, en un lapso de tiempo de 250 minutos (**Figura 18**), ambas cinéticas con un contenido inicial de 0.2172 g agua/g materia seca. A estas temperaturas de secado las vainas pierden poca humedad y no alcanzan un contenido de humedad suficientemente bajo para ser granuladas. Se observa que el efecto de temperatura es importante lo que provoca que el coeficiente de difusión sea mayor a 50 °C respecto a 40 °C. La curva de secado a 40 °C alcanza el equilibrio aproximadamente a los 150 minutos, mientras que la curva de secado a 50 °C lo alcanza pasados los 200 minutos.

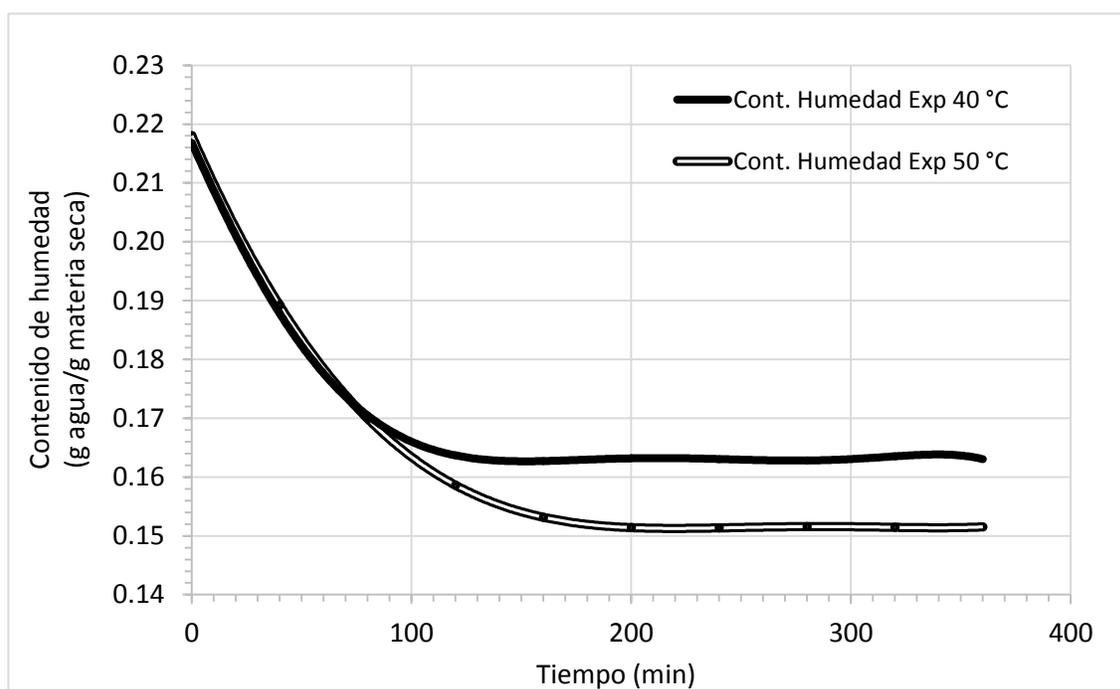


Figura 18. Cinéticas de secado experimentales (40 °C y 50 °C).

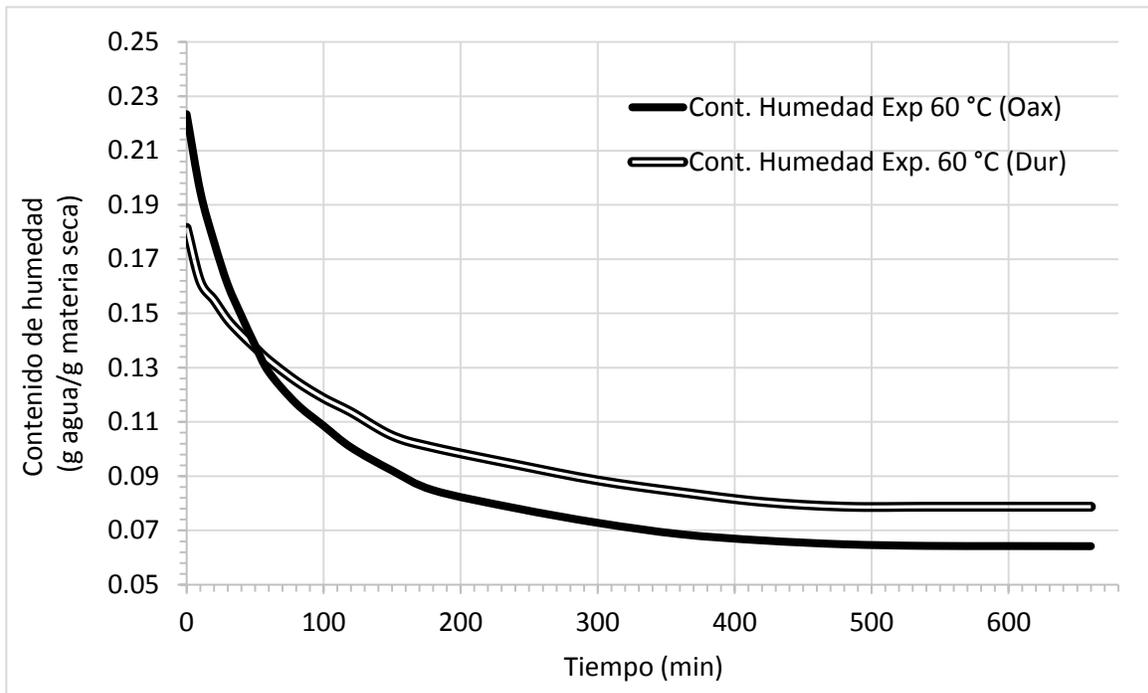


Figura 19. Cinéticas de secado experimentales (60 °C).

En la **Figura 19** se observan las cinéticas de secado de 60°C; las vainas de Oaxaca con un contenido de humedad inicial (**W**) de 0.2234 g agua/g materia seca, alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio de 0.06 g agua/g materia seca \pm 0.01, en un lapso de tiempo de 660 minutos. Las vainas de Durango con un contenido de humedad (**W**) inicial de 0.1815 g agua/g materia seca, alcanzaron un contenido de humedad de 0.07 g agua/ g materia seca \pm 0.003, en un lapso de 600 minutos. La curva de secado a 60 °C de Oaxaca alcanza el equilibrio aproximadamente a los 450 minutos, en tanto que la curva de secado a 60 °C de Durango lo alcanza aproximadamente a los 500 minutos. Las vainas secadas a esta temperatura tienen un contenido de humedad de equilibrio bajo que permite su granulación y se considera como el nivel de temperatura mínimo para el secado de este material, de otra forma se presentarían problemas de apelmazamiento en el proceso de molienda.

Para cada experimento se observa un efecto importante de la temperatura principalmente en el contenido de humedad en equilibrio al que llegan las curvas de secado. La rapidez de secado es mayor al inicio del proceso de secado acentuándose este comportamiento cuando es más elevada la temperatura del secado; disminuyendo progresivamente hasta que se alcanza el contenido de humedad de equilibrio.

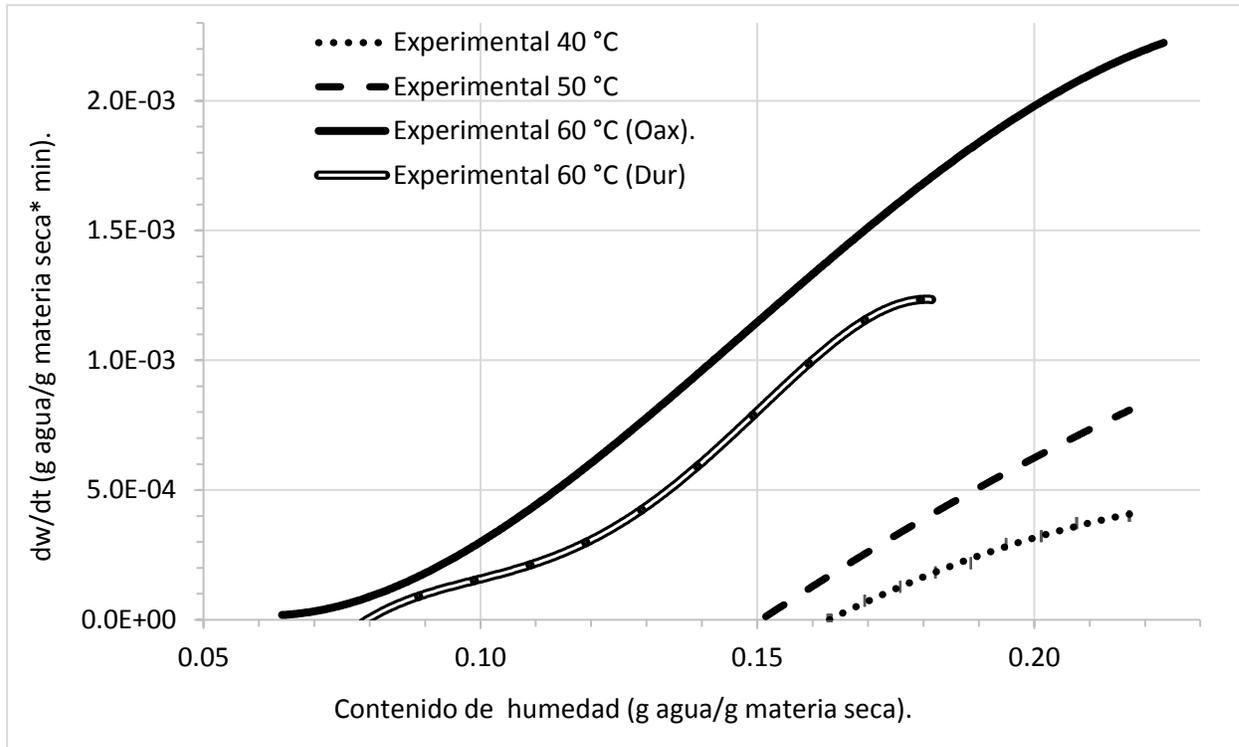


Figura 20. Curvas de rapidez de secado experimentales.

En la **Figura 20** se muestran las curvas de rapidez de secado, en donde existe una marcada diferencia de la rapidez de la eliminación de humedad durante el secado en todos los experimentos (40 ° C, 50 ° C y 60 ° C).

Las curvas de rapidez de secado muestran un comportamiento decreciente durante todo el secado. La etapa de calentamiento del material es imperceptible y carecen del periodo de rapidez de secado constante. Las curvas de rapidez de 60 °C de Oaxaca y Durango tienen una tasa de evaporación de humedad más elevada y alcanzan un contenido de humedad menor en comparación con las curvas de rapidez de 40 °C y 50 °C.

La **Figura 21** muestra los perfiles de temperatura del centro de las vainas secadas a 40 °C y 50 °C. El material alcanza la temperatura del aire de secado en un periodo de tiempo de 30 minutos, en ambos experimentos siguiendo un comportamiento similar. Se observa que las vainas aumentan en temperatura rápidamente, sin embargo la remoción de humedad continua desde el tiempo 0 hasta los 150 y 200 minutos, lo cual indica la presencia de resistencia interna a la transferencia de humedad.

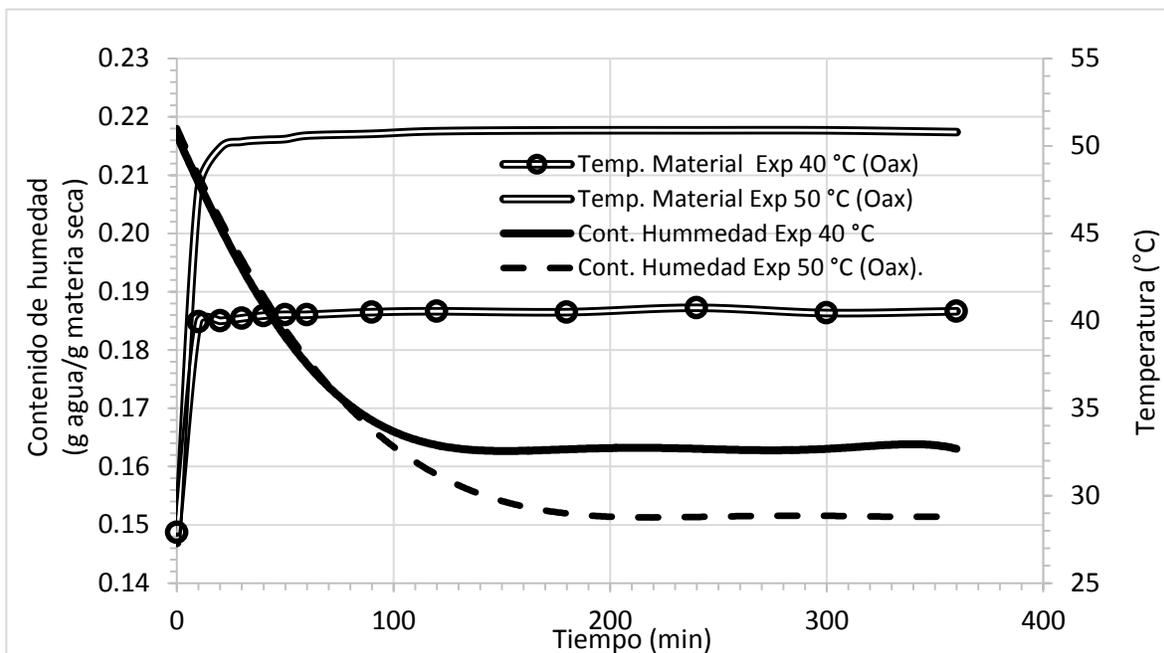


Figura 21. Cinéticas de secado y perfiles de temperatura de las vainas (40 °C y 50 °C).

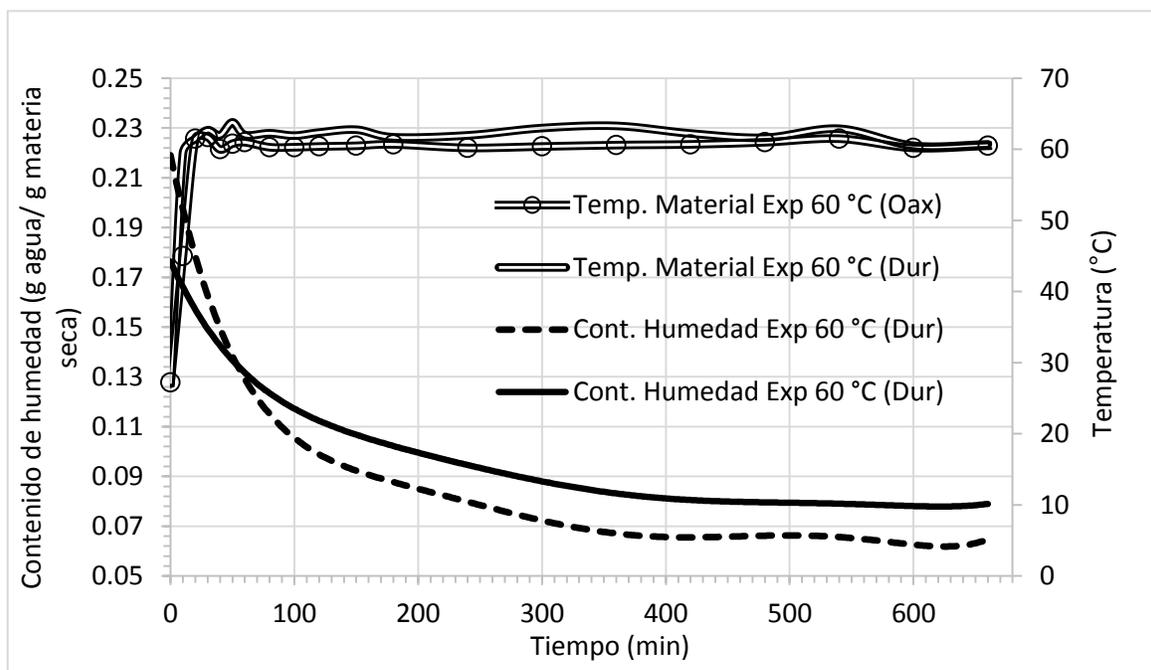


Figura 22. Cinéticas de secado y perfiles de temperatura de las vainas (60 °C).

La **Figura 22** muestra los perfiles de temperatura del centro de las vainas de Oaxaca y Durango secadas a 60 °C. Como en anteriores condiciones de secado se observa como el material alcanza la temperatura del aire de secado aproximadamente en 30 minutos. Como se mencionó anteriormente la migración de humedad del interior de la vaina presenta un problema ya que las estructuras internas del material son complejas y un factor limitante para

la transferencia de masa, este efecto se encuentra ligado a la temperatura del proceso de secado observándose una mayor rapidez y eliminación de humedad conforme se incrementa la temperatura.

4.6. Curva característica de secado.

La **Figura 23** muestra la variación del contenido de humedad reducida de las vainas de Oaxaca (40 °C, 50 °C y 60 °C) y Durango (60 °C), donde el contenido máximo de humedad es 1.

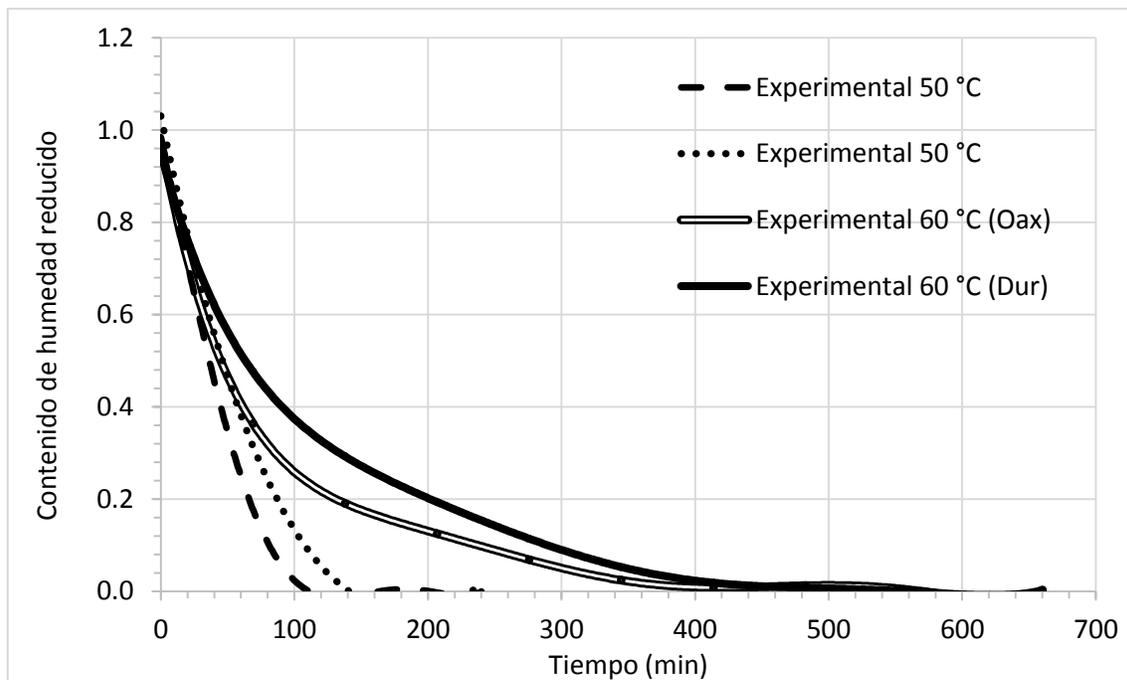


Figura 23. Cinéticas de secado normalizadas.

Las curvas de rapidez (**Figura 24**) presentaron 3 periodos del secado, el primer periodo un muy ligero incremento de la rapidez de secado es casi imperceptible (fase de calentamiento del material) pues sucede muy rápido comparado con la duración total del secado. El segundo periodo presenta un comportamiento lineal con tendencia decreciente debido a la dificultad de la remoción del agua lo cual implicar una cantidad de energía extra para romper los enlaces que unen las moléculas de agua al material, así como la deformación y la complejidad de la microestructura interna. Este comportamiento fue igual en todas las curvas de rapidez (40 °C, 50 °C y 60 °C). El tercer y último periodo fue despreciado por su corta duración y el bajo contenido de humedad que representa (Jannot *et al*, 2004).

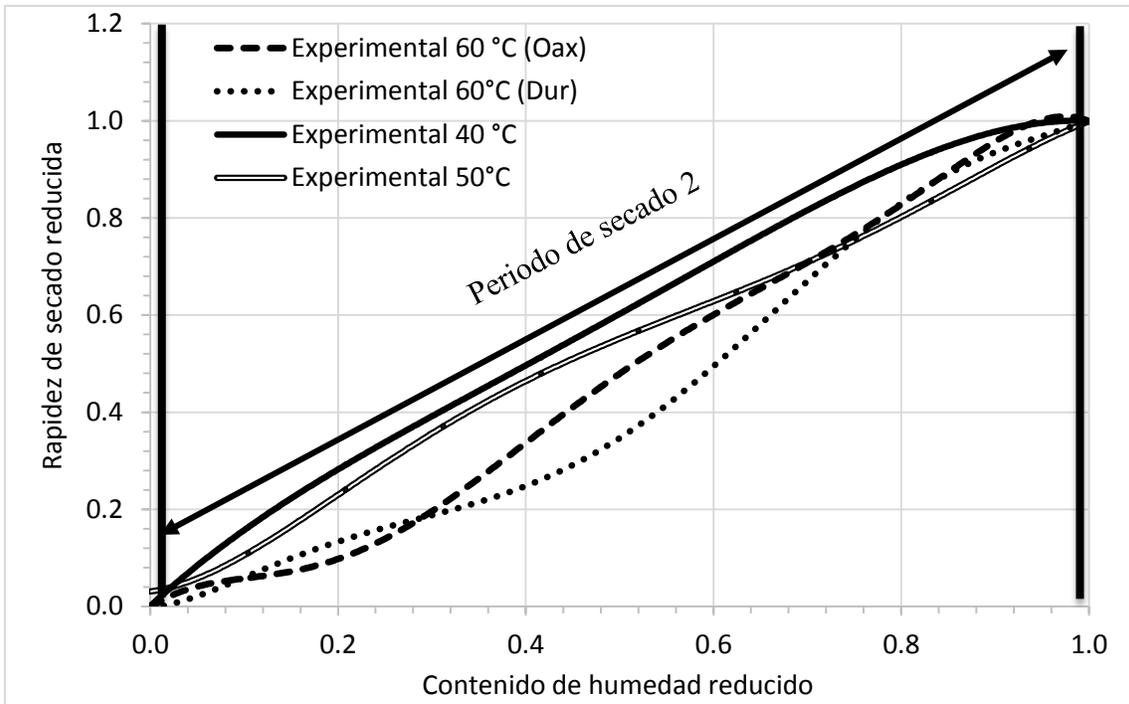


Figura 24. Rapidez de secado reducida a diferentes temperaturas.

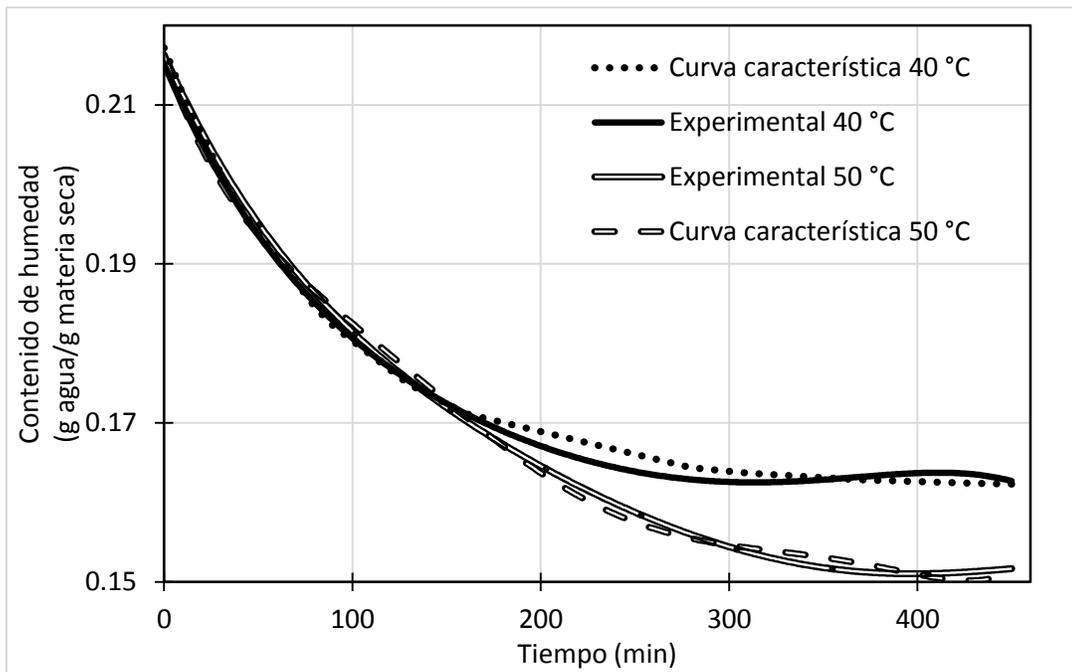


Figura 25. Comparación datos experimentales con la curva característica (40 °C, 50 °C).

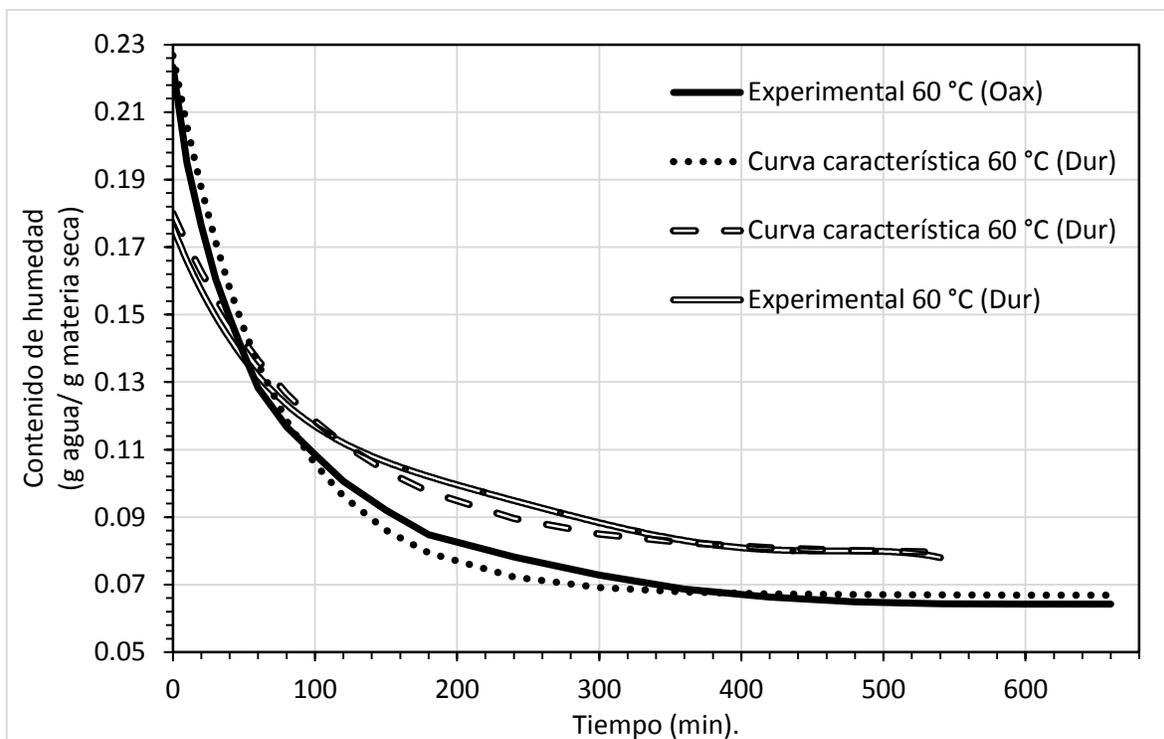


Figura 26. Comparación datos experimentales con la curva característica Oaxaca y Durango (60 °C).

La **Tabla 5** muestra los parámetros que se obtuvieron con el cálculo de la curva característica. Las **Figura 25** muestra las cinéticas de secado experimentales de Oaxaca (40 ° C, 50 °) en comparación con la curva característica. La **Figura 26** muestra las cinéticas de secado experimentales de Oaxaca y Durango (60 ° C) en comparación con la curva característica. La curva característica simuló las curvas experimentales con un error máximo de 0.001 g agua/ g materia seca 40 °C Oaxaca, 0.0006 g agua/ g materia seca 50 °C Oaxaca, 0.04 g agua /g materia seca 60 °C Oaxaca y 0.01 g agua /g materia seca 60 °C Durango, el valor de error es menor al reportado por otros autores (Jannot *et al*, 2004).

Tabla 5. Parámetros calculados para la curva característica.

Origen	Temperatura °C	dW_{ref}	c	d
Oaxaca	40 ° C	0.0004	1.5162	0.0287
Oaxaca	50 °C	0.0008	1.1250	0.0166
Oaxaca	60 °C	0.0022	1.0488	0.0014
Durango	60 °C	0.0011	0.9036	0.0067

4.7. Coeficientes de difusión efectivo.

Los valores de los coeficientes de difusión ($Deff$) (**Tabla 6**) dependieron principalmente de la temperatura del aire de secado, a pesar de que en los experimentos de secado la velocidad del aire y humedad relativa se mantuvieron constantes. Estos datos son consistentes con los reportados por otros autores durante el secado de vegetales, estos señalaron que la temperatura de secado tuvo un efecto mayor en el valor de $Deff$ en comparación con la velocidad del aire y humedad relativa (Mulet *et al*, 1989).

A excepción de las vainas de Durango que muestran un valor menor de $Deff$ en comparación con las vainas de Oaxaca, estas vainas provienen de una región diferente por lo cual el material presenta variaciones a pesar de ser de la misma especie.

Los valores obtenidos son consistentes con los datos de coeficientes de difusión para materiales biológicos que caen en el rango de $10 e^{-11}$ hasta $10 e^{-10} m^2/s$ (Atkins, 2011).

Los coeficientes de difusión de humedad del mezquite son similares al orden del valor de coeficientes de otras leguminosas reportados por otros autores: lentejas $3.53 e^{-10} m^2/s$, frijoles $9.54 e^{-10} m^2/s$, garbanzos $9.71 e^{-11} m^2/s$ (Gürtaş *et al*, 2001) (Ospina *et al*, 2009). La difusión de humedad durante el secado en las vainas se dificulta debido a la ausencia de poros, capacidad higroscópica y estructura física heterogénea y tortuosa.

Tabla 6. Valores de $Deff$ para las vainas de mezquite a diferentes condiciones de secado.

Origen	Condiciones de Secado	$Deff$ (m^2/s)
Oaxaca	40 °C, 2.6 m/s, H.R. 10 %	$1.57366 e^{-10}$
Oaxaca	50 °C, 2.6 m/s, H.R. 10 %	$3.72159 e^{-10}$
Oaxaca	60 °C, 2.6 m/s, H.R. 10 %	$3.74325 e^{-10}$
Durango	60 °C, 2.6 m/s, H.R. 10 %	$2.12853 e^{-10}$

Capítulo 5: Conclusiones.

En el presente trabajo de investigación, se analizó el proceso de secado de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) y las condiciones a las que deben ser secadas para su procesamiento y transformación en productos alimenticios

Las 3 etapas de madurez identificadas presentaron cambios físicos como el color y cambios químicos que permiten conocer cuando las vainas están listas para ser deshidratadas. Las vainas en la etapa 1 y 2 de madurez tienen un sabor amargo y un contenido de humedad elevado. Secar las vainas en estas etapas de madurez resulta en un secado ineficiente y un producto con alto contenido de humedad no apto para su posterior procesamiento. Las vainas en etapa 3 de madurez tienen un contenido de humedad bajo y azúcares que permitieron un proceso de secado eficiente por el cual se obtuvo un material seco listo para ser procesado. Se recomienda recolectar las vainas en esta etapa de madurez para futuros experimentos.

Las imágenes de la estructura física de las vainas obtenidas por estereomicroscopio y microscopio electrónico de barrido, presentaron una estructura heterogénea, compleja y tortuosa. Se identificaron los dominios que componen las vainas: Epicarpio, mesocarpio, endocarpio y la semilla. La complejidad de estos dominios así como la ausencia de poros actúan como una barrera que dificulta la difusión de humedad al momento del secado.

Para cada experimento se observó un efecto importante de la temperatura en el contenido de humedad de equilibrio que alcanza el material. Las vainas secadas a 40 °C y 50 °C no alcanzaron un contenido de humedad suficientemente bajo para ser procesadas. Las vainas secadas a 60 °C alcanzaron un contenido de humedad lo suficientemente bajo para ser granuladas posteriormente. Por lo tanto el nivel de temperatura mínimo al cual deben de secarse las vainas es de 60 °C; si se aplican niveles de temperatura más bajos el tiempo de secado se prolonga y se presentan problemas en su posterior granulación.

La curva característica de secado simuló satisfactoriamente las cinéticas de secado experimentales de Oaxaca y Durango. Esta herramienta tiene la ventaja de predecir cuanto tiempo dura el proceso de secado de las vainas sin la necesidad de conocer todas las propiedades del material. El error reportado fue menor al reportado por otros autores. Este modelo empírico únicamente es aplicable a las vainas de la especie *Prosopis laevigata* con condiciones controladas durante el secado de humedad relativa de 10% y velocidad del aire de 2.6 m/s. Se recomienda realizar el cálculo de los parámetros para mayores cantidades de vaina de mezquite.

Para el cálculo del coeficiente de difusión efectivo se observó el efecto de los niveles de temperatura, este coeficiente incrementó a medida que la temperatura incrementaba. No se observó otro factor que tuviera influencia en el coeficiente pues la humedad relativa y velocidad del aire permanecieron constantes en todos los experimentos. Cabe resaltar que no

se utilizaron todas las propiedades del material y se tomaron en cuenta suposiciones para su cálculo. Como se mencionó con anterioridad. Las vainas de mezquite son un alimento multidominio en donde cada uno de estos sistemas es físicamente diferente; se recomienda estudiar cómo se da la difusión de humedad en cada dominio de la vaina considerando sus propiedades físicas y químicas.

Se espera que la información obtenida en esta investigación sea de utilidad para optimizar procesos de producción y el desarrollo de nuevas técnicas para el aprovechamiento de las vainas de mezquite.

6. Bibliografía.

1. Artigas, J. M. Capilla, P. Pujol, J. (2002). *Fundamentos de colorimetría*. Universidad de Valencia. D'aquesta Ediciones.
2. Anchia, I. A. Aldaz, B. L. Hernández, J. H. M. Plana, A.H.A. (2003). *Alimentos y nutrición en la práctica sanitaria*. Madrid España. Ediciones Díaz de Santos.
3. Atkins, P., De Paula, J. (2011). *Physical chemistry for the life sciences*. Oxford University Press, USA.
4. Badui D. S. (2006). *Química de los alimentos*. México. Pearson Educación.
5. Baker, C. (1997). *Industrial drying of foods*. Kuwait University. Blackie Academic & Professional.
6. Bigne, F., Puppo, M. C., Ferrero, C. (2016). Fibre enrichment of wheat flour with mesquite (*Prosopis* spp.): Effect on breadmaking performance and staling. *Food Science and Technology*, (65), 1008-1016.
7. Bimbenet, J. J., Duquenoy, A., & Trystram, G. (2002). *Génie des procédés alimentaires: Des bases aux applications*. Dunod.
8. Casanueva, E., Arroyo, P., Kaufer, H. M., Pérez, A. B. (2001). *Nutriología médica*. México D.F. Médica Panamericana.
9. Cerón, O. A. N., Vidal, G. A. Y., Ángeles M. 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.
10. Choge, S. K., Pasiiecznik, N. M., Harvey, M., Wright, J., Awan, S. Z., Harris, P. J. C. (2007). *Prosopis pods as human food, with special reference to Kenya*. *Water Sa*, 33(3).
11. Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. New York. Oxford University Press.
12. Cruz, I., Sauad, J., Condorí, M. (2012). El proceso de secado de las vainas de algarrobo. Una experiencia participativa en el diseño de nuevas propuestas de secado solar en santa maría, provincia de catamarca. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. (16), 19-26.
13. De La Rosa, D., Barba, A. P., Frias H. J. T., Olalde P. V., González C. J. (2006). Processing, nutritional evaluation, and utilization of whole mesquite flour (*Prosopis laevigata*). *Journal of food science*, 71(4), 315-320.
14. Dincer, I., Zamfirescu, C. (2015). *Drying Phenomena: Theory and Applications*. Canada. University of Ontario Institute of Technology.
15. Earle, R. L. (1998). *Ingeniería de los alimentos (las operaciones básicas del procesado de los alimentos)*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.

16. Felger, R. S. (1977). Mesquite in Indian cultures of southwestern North America. Mesquite, its Biology in Two Desert Scrub Ecosystems. New York. Haldstes Press.
17. 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(4), 517-528.
18. 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.
19. Figueroa, G. G., Dantas, M. (2006). Recolección, procesamiento y consumo de frutos silvestres en el noroeste semiárido argentino. Casos actuales con implicancias arqueológicas. *La Zaranda de Ideas*, (2), 35-50.
20. Figura, L., Teixeira, A. A. (2007). *Food physics: physical properties-measurement and applications*. Germany. Springer.
21. Freyre, M., Astrada, E., Blasco, C., Baigorria, C., Rozycki, V., Bernardi, C. (2003). Valores Nutricionales de Frutos de Vinal (*Prosopis ruscifolia*): Consumo Humano y Animal. *CYTA-Journal of Food*, 4(1), 41-46.
22. Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. University of Minnesota. Compañía Editorial Continental.
23. Grados, N., Cruz, G. (1996). New approaches to industrialization of algarrobo (*Prosopis pallida*) pods in Peru. *Prosopis: Semiarid fuelwood and forage tree, Texas: Center for Semi-Arid Forest Resources*. 3-25.
24. 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.
25. Gürtaş, F. S. M., Evranuz, E. Ö. (2001). Water diffusion coefficients of selected legumes grown in Turkey as affected by temperature and variety. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 25(5), 297-304.
26. Hui, Y. H. (Ed.). (2008). *Food drying science and technology: microbiology, chemistry, applications*. USA. DEStech Publications, Inc.
27. Ibarz, A., Ribas, A. I. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Madrid. Mundi-Prensa Libros.
28. Iglesias, H. (2012). *Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components*. Argentina. Elsevier.
29. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México. Pearson Educación.
30. Inventario Nacional Forestal. 1977. Secretaría de Agricultura de México.
31. Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2010). *Drying of foods, vegetables and fruits*. Singapore.
32. Jannot, Y., Talla, A., Nganhou, J., Puiggali, J. R. (2004). Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. *Drying technology*, 22(8), 1949-1968.

33. Karel, M., & Lund, D. B. (1975). *Physical principles of food preservation*. Dekker Incorporated.
34. Labuza, T. P., Hyman, C. R. (1998). Moisture migration and control in multidomain foods. *Trends in Food Science & Technology*, 9(2), 47-55.
35. León, M. V., Prades, F. M. C., Rodríguez, L. P., Orduño, M. G., Toro, D. C., Ceballos, V. O. (2007) Equilibrio higroscópico de variedades de soya Glycine max (L) Merrill cosechadas de forma manual y mecanizada.
36. Leon, M.A., Kumar, S. And S.C. Bhattacharya. 2002. A Comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (6). 367-393
37. Mejía, J. E. O., Cuervo, S. P. (1995). Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del ajonjolí. Sésamun indicum L. *Ingeniería e Investigación*, (31), 3-12.
38. Meyer, D. (1984). Processing, utilization and economics of mesquite pods as a raw material for the food industry (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
39. Mom, M. P. (2012). Caracterización estructural y propiedades funcionales de las harinas de los frutos de Prosopis alba Griseb., P. chilensis (Molina) Stuntz emend. Burkart 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).
40. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying*. USA. Crc Press.
41. Mulet, A., Berna, A., Rossello, C. (1989). Drying of Carrots. I. Drying models. *Drying Technology*, 7(3), 537-557.
42. Ospina, J. F. A., Castro, R. A. F. (2009). Aplicación de la ley de fick y el modelo de peleg para estudiar la absorción de agua en el frijol cargamanto ombligo amarillo (phaseolus vulgaris L.) y la arveja seca (pisan sativa) durante la rehidratación. *Publicaciones e Investigación*, 3(1), 15-28.
43. Prokopiuk, D. B. (2008). Sucedáneo del café a partir de algarroba (prosopis alba griseb). (Doctoral dissertation).
44. Prokopiuk, D., Cruz, G., Grados, N., Garro, O., Chiralt, A. (2000). Estudio comparativo entre frutos de Prosopis alba y Prosopis pallida. *Multequina*, 9(1), 35-45.
45. Ramírez, M. C. C. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina. 3388-3407.
46. Ranken, M. D. (2012). *Food industries manual*. New York. Springer Science & Business Media.
47. Raven, P. H., Evert, R. F., Eichhorn, S. E. (1992). *Biología de las plantas*. USA. Reverté.
48. Rzedowski, J. (1988). Análisis de la distribución geográfica del complejo Prosopis (Leguminosae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Botánica Mexicana*, (3), 7-19.

49. Saucedo, E. N. R., Martínez, G. E. R., Ramírez, B., Torres, M., Ruiz, H. H. P. (2014). Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) En México. *Ra Ximhai*, 10(3), 173-193.
50. SAGARPA. (2015) Identifican Municipios con Zonas Áridas y Semiáridas. <https://www.gob.mx/sagarpa>.
51. Simpson, B. B. (1977). *Mesquite: its biology in two desert scrub ecosystems*. USA. Synthesis Series.
52. Singh, R. P., Heldman, D. R. (2001). *Introduction to food engineering*. USA. Gulf Professional Publishing.
53. Treybal, R. E. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México. McGraw Hill
54. Troller, J. (2012). *Water activity and food*. USA. Elsevier.
55. Víglaský J., Langová N., & Horbaj P. (1987). A solar timber-dryer equipped with an air collector. *Komunikacie*, 8(2), 1335-4205.
56. Zhang, G. G., Chen, Y., & Qiu, Y. (2009). *Developing solid oral dosage forms: pharmaceutical theory and practice*. United Kingdom. Elsevier.

7. Anexos.

7.1. Verificación de velocidad del aire en cámara del secador de bandejas tipo túnel.

Se evaluó la velocidad del secador de bandejas tipo túnel utilizado durante el secado con número de patente 304462 del CIIDIR Oaxaca. Esta verificación se llevó a cabo en 27 posiciones de la cámara de secado en donde se colocaron las vainas utilizando un anemómetro.

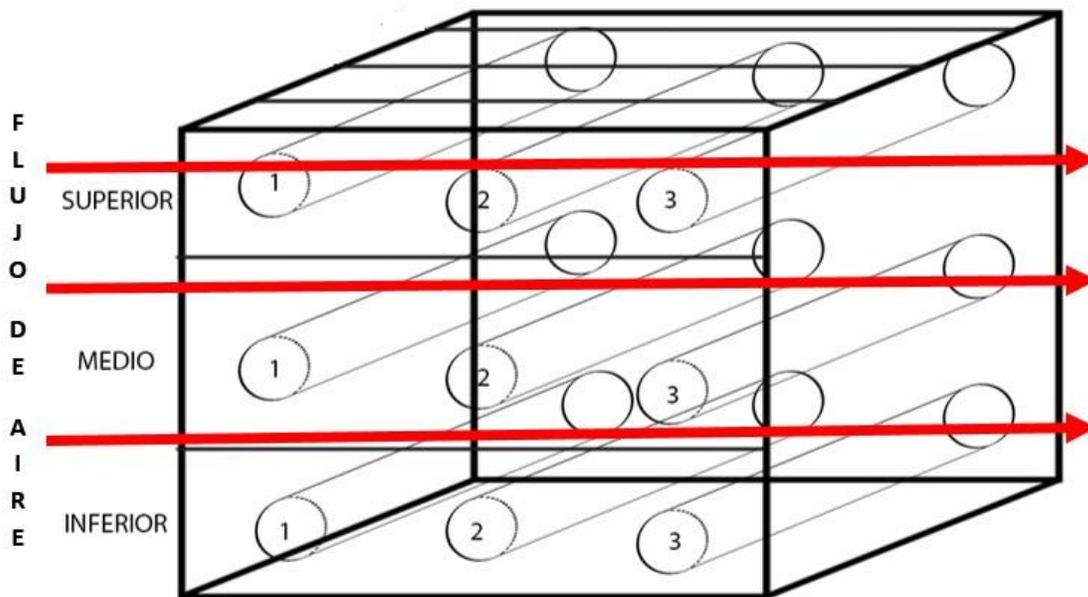


Figura 27. Esquema de la cámara de secado a evaluar.

Se colocó una placa de madera en la puerta de la cámara de secado; esta contó con orificios previamente distribuidos como se explica a continuación. Se seccionó la cámara en 3 partes (inferior, medio y superior) cada una dividida en otras 3 secciones (1, 2 y 3) como se muestra en la Figura X; a la vez cada una de estas secciones se dividió en 3 posiciones de profundidad en donde se realizaron las mediciones. Se introdujo en cada sección un anemómetro y realizando 5 repeticiones en cada punto para obtener un promedio de la velocidad de esa posición específica. A continuación se presentan las gráficas de flujo de aire en las diferentes secciones.

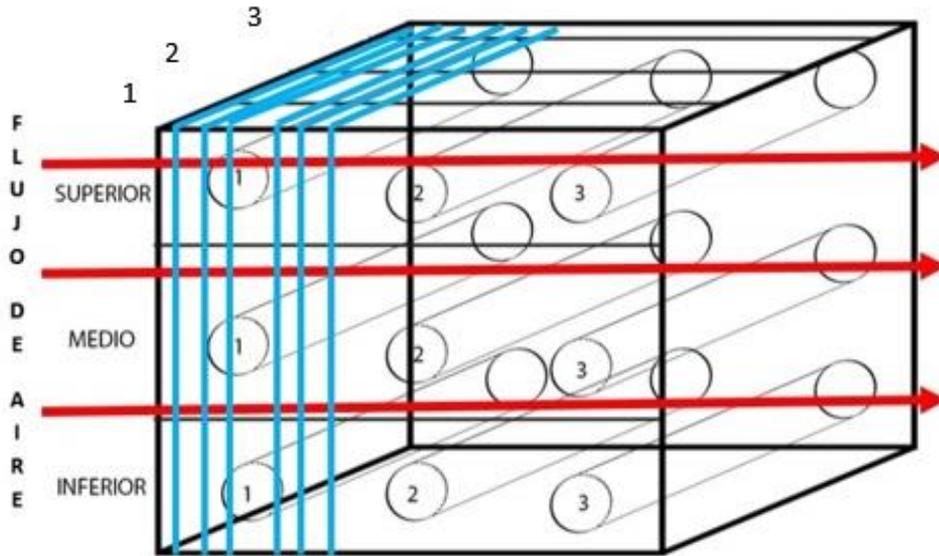


Figura 28. 1ª sección de la cámara de secado evaluada.

En esta sección de la cámara de secado (**Figura 31**) se observa como la velocidad del aire es más elevada en la sección inferior de la cámara en los primeros puntos de posición y a medida que nos adentramos en la cámara a los puntos de posición más profundos se muestra una disminución de la velocidad del aire.

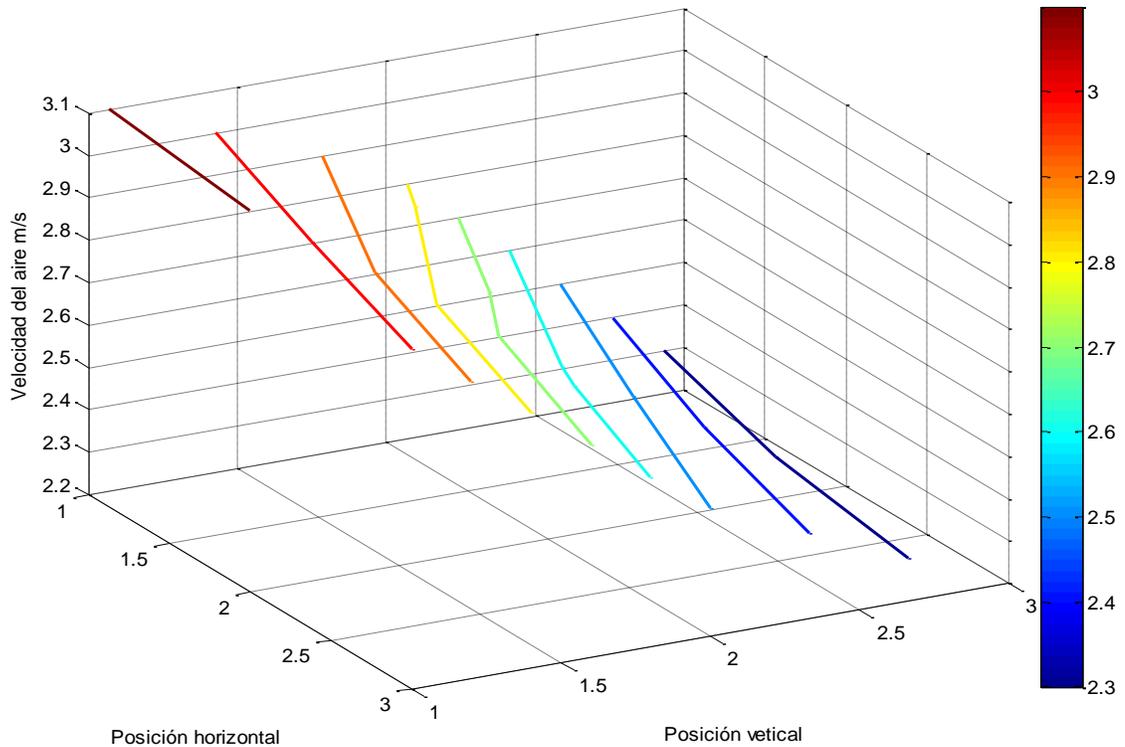


Figura 29. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (1ª Sección).

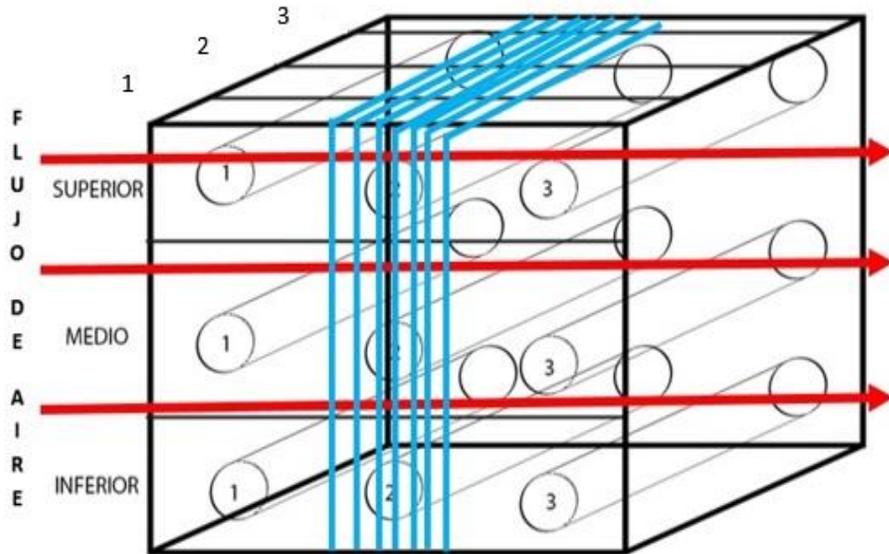


Figura 30. 2ª sección de la cámara de secado evaluada.

En la segunda sección (**Figura 33**) se puede observar cómo se repite el comportamiento de la primera sección; la velocidad del aire de secado es más elevada en la parte inferior de la cámara en los primeros puntos de posición y a medida que se incrementa la profundidad la velocidad del aire disminuye.

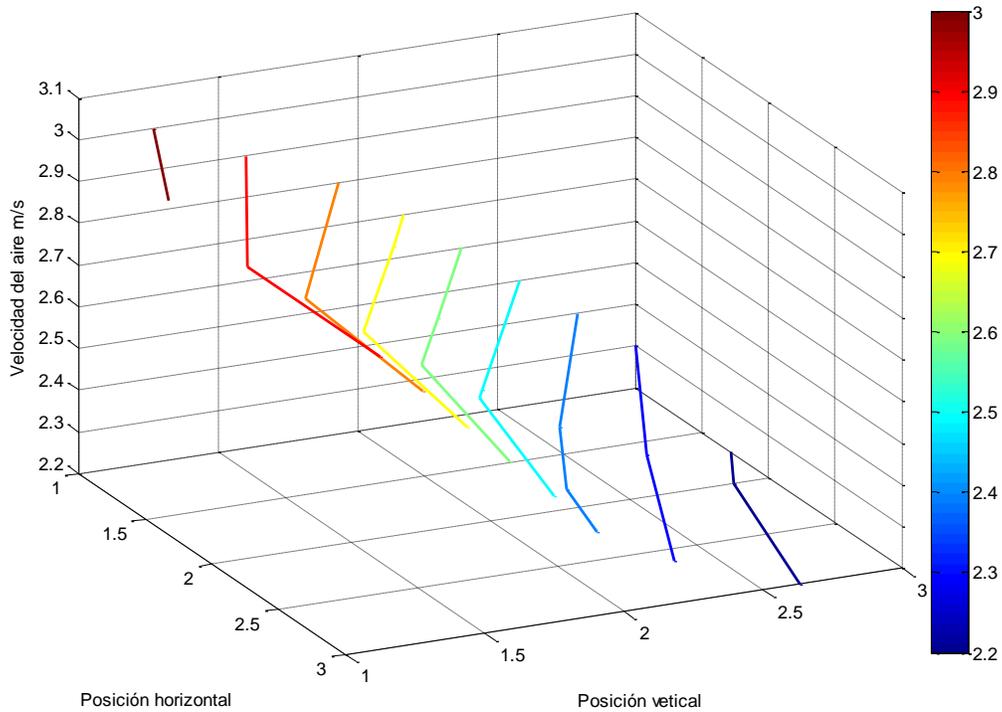


Figura 31. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (2ª Sección).

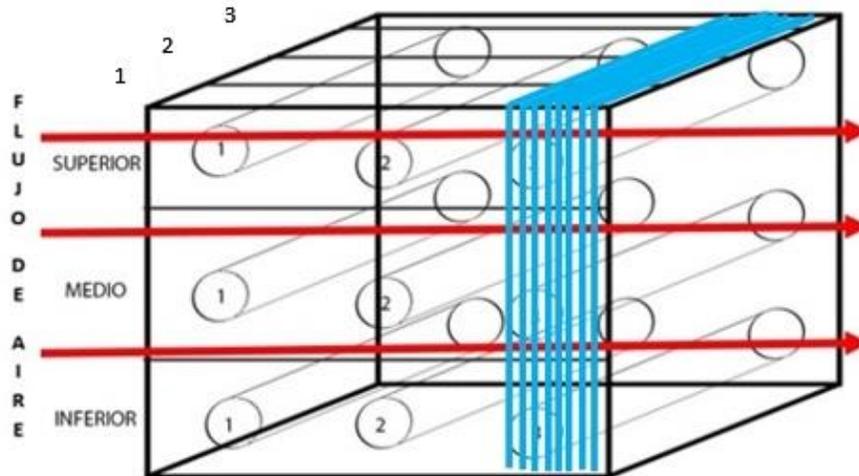


Figura 32. 3ª sección de la cámara de secado evaluada.

En la tercera sección (**Figura 35**) de la cámara de secado se repite el comportamiento de las primeras secciones, a medida que se incrementa la profundidad la velocidad del aire va disminuyendo.

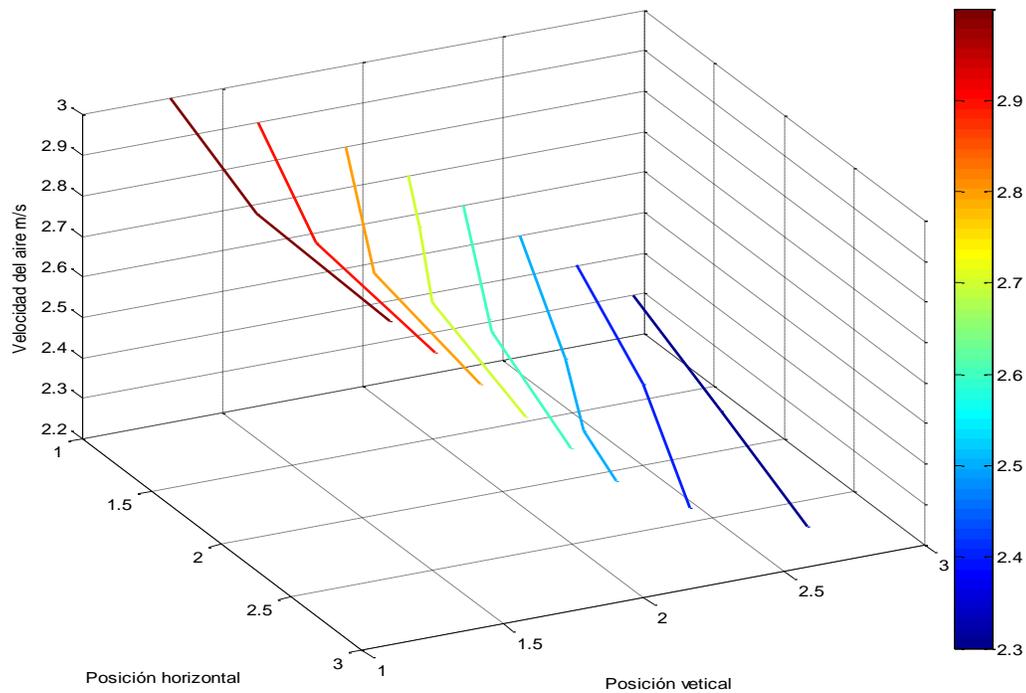


Figura 33. Distribución de la velocidad del aire en la cámara de secado (3ª Sección).

Cabe resaltar que el gradiente de velocidad del aire varía ampliamente de una sección a otra lo que influye en el secado de muestras en la cámara de secado pues el flujo del aire no es uniforme en toda la cámara de secado (Mujumdar, 2014).

7.2. Procedimiento para el uso de la curva característica.

1. Identificar la rapidez de referencia (W_{ref}) de la curva de rapidez de secado experimental, este valor se considera como el valor máximo de rapidez de secado de la curva.
2. Identificar el contenido de humedad crítico (W_c) este se considera como el contenido de humedad inicial del material y contenido de humedad de equilibrio (W_{eq}) de las cinéticas experimentales de secado.

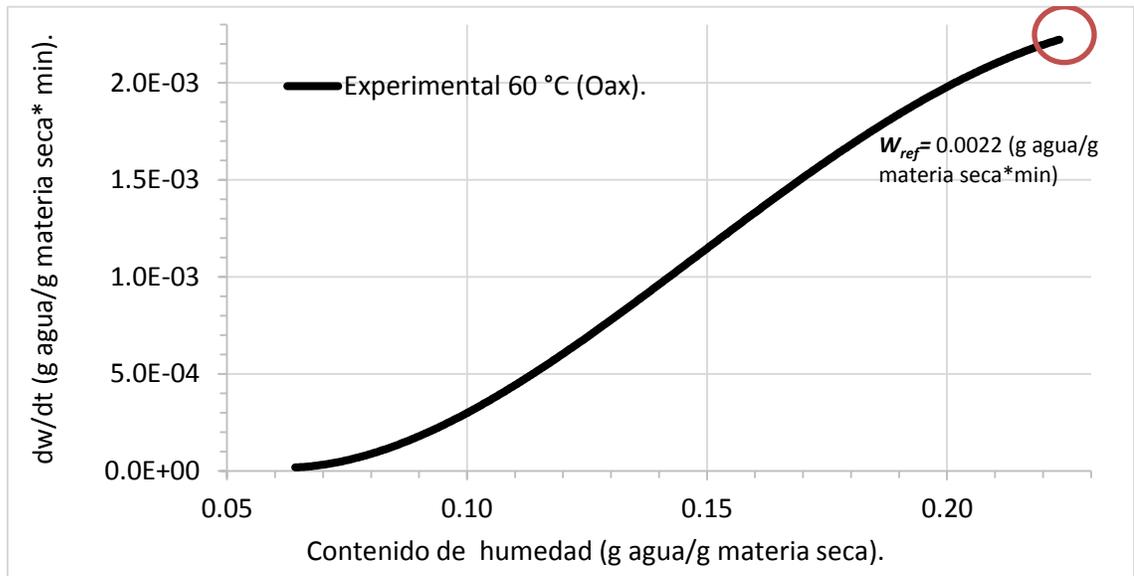


Figura 34. Indicación de la rapidez de secado de referencia (W_{ref}).

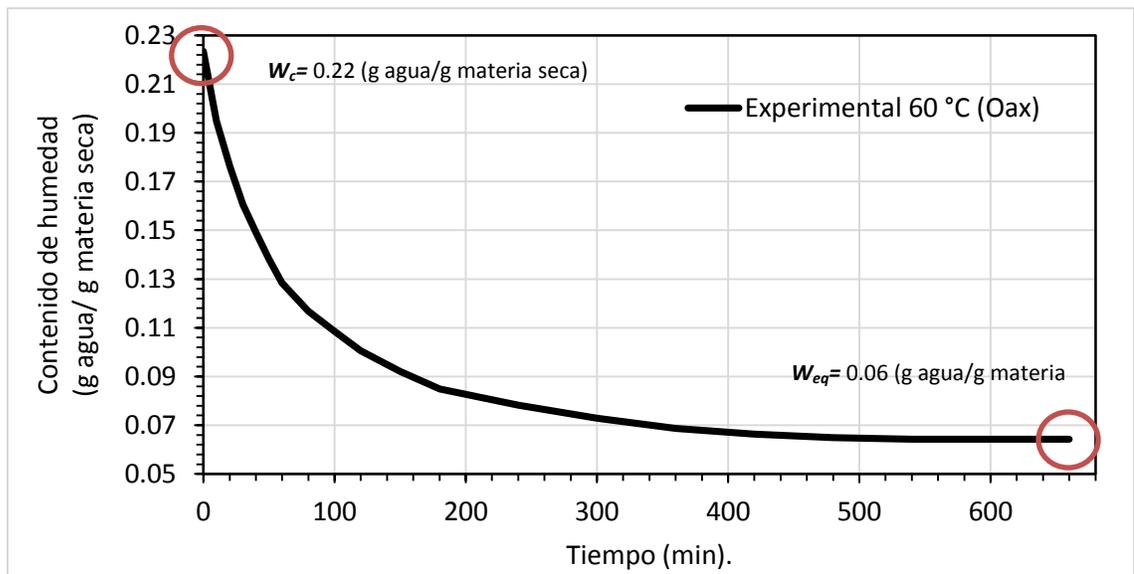


Figura 35. Indicación del contenido de humedad crítico (W_c) y contenido de humedad de equilibrio (W_{eq})

3. Sustitución de valores en ecuación de curva característica.

$$W = W_{eq} + (W_c - W_{eq}) \left[\left(1 + \frac{d}{c} \right) e^{\frac{-c*W_{ref}*t}{W_c - W_{eq}}} - \frac{d}{c} \right]$$

El valor de t es el tiempo al cual se quiere calcular el valor de contenido de humedad W en la cinética; para este ejemplo utilizaremos el valor de W al tiempo de 150 minutos.

Los valores de los parámetros d y c son calculados con Solver minimizando la suma de errores cuadráticos de todos los valores calculados de W . En este ejemplo los valores calculados de c y d se muestran a continuación. Es importante otorgar valores aleatorios a c y d ; la herramienta Solver otorgará valores disminuyendo el valor de error lo más cercano a 0.

$$W = 0.06 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} + \left(0.22 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} - 0.06 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} \right) \left[\left(1 + \frac{d}{c} \right) e^{\frac{-c*0.0022 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} * 150 \text{ min}}{0.22 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}} - 0.06 \frac{g \text{ agua}}{g \text{ materia seca}}}} - \frac{d}{c} \right] =$$

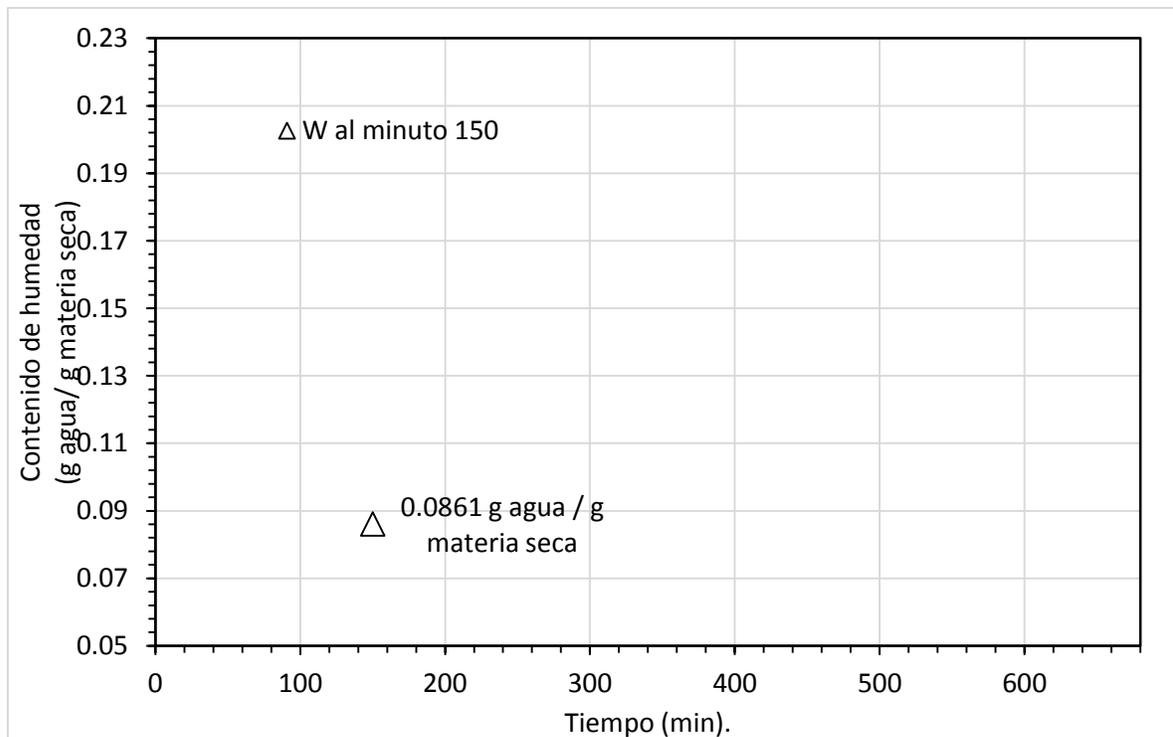


Figura 36. Cálculo de W a t 150 minutos utilizando ecuación de curva característica.