

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN.**

**CAMBIOS EN PIÑA Y MANZANA DURANTE EL  
PROCESO DE DESHIDRATACION OSMOTICA.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO EN LIMENTOS**

**P R E S E N T A:**

**BENITO**

**CRUZ**

**DIAZ**

**ASESORAS: DRA. MARIA ELENA VARGAS UGALDE  
M. EN C. MARTA ELVIA ROSAS MENDOZA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

**ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS**

S. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

**DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE**

**ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

**Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos  
comunicar a usted que revisamos la Tesis :**

Cambios en piña y manzana durante el proceso de deshidratación osmótica  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**que presenta el pasante:** Benito Cruz Díaz  
**con número de cuenta:** 091143178 **para obtener el título de :**  
Ingeniero en Alimentos

**Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en  
el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.**

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 8 de febrero de 2008.

<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. María Elena Vargas Ugalde</u>	<u>me Elena Vargas Ugalde</u>
<b>VOCAL</b>	<u>F.Q. Oscar Germán Ibarra</u>	<u>Oscar Ibarra</u>
<b>SECRETARIO</b>	<u>M.en C. Julieta González Sanchez</u>	<u>Julieta González</u>
<b>PRIMER SUPLENTE</b>	<u>F.A. Miriam Alvarez Velasco</u>	<u>Miriam Alvarez</u>
<b>SEGUNDO SUPLENTE</b>	<u>F.A. Javier Cruz Maranto</u>	<u>Javier Cruz</u>

*Un libro abierto es un cerebro que habla; cerrado un amigo que espera; olvidado, un alma que perdona; destruido, un corazón que llora.*

**Proverbio hindú**

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

---

### *A DIOS:*

Primeramente por darme la vida y después por proveerme de la fuerzas suficientes para concluir mis estudios, por estar siempre conmigo aun en esos momentos difíciles en lo que pensé en renunciar a ellos. Hoy se que fuiste tu señor quien no me soltó de la mano para no hacerlo, por esto y todo lo que me has dado. Gracias.

### *A mis padres y hermanos:*

A mi padre y madre por todo su apoyo, amor y cariño. Por enseñarnos a portar el estandarte de la perseverancia y tenacidad en cualquier departamento de nuestras vidas. Y por que nunca perdieron la esperanza de que pudiera salir adelante. A mis hermanos y hermanas por estar al pendiente de mí en todo momento. Dios los bendiga.

### *A las familias:*

Cruz Nava, y Valencia Fozado. Por su apoyo confianza y cariño incondicional en todo momento. Por abrirme las puertas de su hogar, siendo un desconocido. Dios los bendiga. Gracias.

### *A la familia:*

Cruz Larios. Por todo su apoyo y cariño por enseñarme que no importa cuantas veces se caiga, sino que lo mas importante es levantarse y aprender de las experiencias de la vida.

### *A mis asesoras:*

Maria Elena Vargas Ugalde y Marta E. Rosas Mendoza. Por su apoyo, disposición y paciencia ante todos los altibajos e informalidades que se llegaron a presentar. Nunca se negaron a compartirme sus conocimientos, muchas gracias por todo.

*A la profesora:*

Rosalía Meléndez. Por su apoyo y contribución a este trabajo en la parte del arreglo ortogonal.

*Al depto. de Microscopia electrónica de barrido.*

Por permitirme el uso del equipo, en especial a la M en C Sofía González Gallardo, Q.F.B. Rosario Ruiz Venegas y al Tec. Rodolfo Robles.

*A mis compañeros y amigos.*

Prefiero omitir nombres para no herir con el olvido en este momento a alguno de ellos. Pero a cada uno de ustedes que me permitieron compartir un momento feliz o desafortunado de la carrera, gracias. Por que el resultado de todo ello fue que se entrelazaran más fuertemente los lazos de amistad.

*A mis compañeros y amigos de grupo.*

Por tenderme la mano cuando más lo necesitaba y enseñarme que el sufrimiento es la piedra angular del crecimiento. Felices 24 hrs compañeros.

# INDICE.

i

Índice de Cuadros	iii
Índice de Figuras	iv
Resumen	1
Introducción	3
<b>CAPITULO1: Marco teórico</b>	
1.1 Generalidades de las frutas y su conservación	5
1.1.2 Piña ( <i>ananas comosus</i> )	9
1.1.3 Manzana ( <i>pumila</i> )	10
1.2 Generalidades de las operaciones y procesos de transferencia de masa	11
1.2.1 Mecanismos de transferencia de masa	11
1.2.2 Coeficiente de difusión y ley de Fick	13
1.2.3 Modelo del coeficiente de transferencia de masa	16
1.3 Deshidratación osmótica (DO)	17
1.3.1 Variables de proceso	21
1.3.2 Ventajas y desventajas del proceso de DO	24
1.4 Textura en los alimentos procesados	27
1.4.1 Efectos del proceso sobre la pared celular	31
1.5 Microscopía	33
1.6 Diseño de experimentos y método Taguchi	35
<b>CAPITULO2: METODOLOGÍA</b>	
2.1 Objetivos	38
2.2 Cuadro metodológico	39
2.3 Materiales y Métodos	40
2.3.1 Actividad de agua ( <i>Aw</i> )	40
2.3.2 Contenido de sólidos	40
2.3.3 Contenido de humedad	41
2.3.4 Densidad por gravimetría	42
2.3.5 Análisis por microscópico óptico	42
2.3.6 Microscopio electrónico de barrido (MEB)	42
2.3.7 Análisis por penetración	44
2.4 Actividades preliminares	44
2.4.1 Selección de fruta	45
2.4.2 Preparación de la solución osmótica	45
2.4.3 Selección de temperatura de proceso	45
2.4.4 Determinación de la velocidad de agitación	46
2.4.5 Determinación de presión de vacío	46
2.4.6 Selección de parámetros de referencia (dulces cristalizados)	46
2.5 Preparación de muestras	47
2.5.1 Muestras en fresco	47
2.5.2 Muestras procesadas	48
2.5.3 Equipo utilizado	48
2.6 Diseño experimental	49

vi

2.6.1 Ganancia de sólidos	50
2.6.2 Pérdida de humedad	50
2.6.3 Coeficiente de difusión	50
2.7 Análisis de resultados y selección de la mejor corrida	52
2.8 Análisis por microscópico y textural	52
2.9 Comparación del deshidratado osmotico Vs. Secado convectivo	53
<b>CAPITULO 3. RESULTADOS</b>	
3.1 Actividades preliminares	54
3.1.1 Fruta fresca	54
3.1.2 Selección de los dulces cristalizados “modelo”	54
3.1.3 Establecimiento de temperatura de proceso	56
3.2 Estudio cinético	57
3.2.1 Pérdida de humedad (WL) y humedad final	58
3.2.2 Ganancia de sólidos	61
3.2.3 Coeficiente de difusión	64
3.2.4 Comportamiento de (SG Y WL)	66
3.2.5 Niveles recomendados	67
3.3 Estudio textural y microscópico	69
3.3.1 Análisis de textura	69
3.3.2 Análisis óptico	74
3.4 Comparación de deshidratación osmótica Vs. secado convectivo	78
3.4.1 Contenido de humedad	78
3.4.2 Análisis de textura	79
3.4.3 Análisis microscópico (MEB)	81
4. Conclusiones	83
5. Recomendaciones	85
6. Anexo 1. Glosario de términos	86
7. Anexo 2. Nomenclatura	88
8. Referencias	91



## INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1: Composición química de la piña	9
Cuadro 2: Composición química de la manzana	10
Cuadro 3: Diseño experimental de L <sub>16</sub> Taguchi	49
Cuadro 4: Valores promedio de fruta fresca	54
Cuadro 5: Valores de referencia en producto modelo	55
Cuadro 6: Resultados obtenidos para la selección de la mayor temperatura	56
Cuadro 7: Parámetros calculados en la deshidratación osmótica	58
Cuadro 8: Niveles recomendados por el análisis de Taguchi	68
Cuadro 9: Comparación de resultados de la "mejor corrida" Vs. "ideal"	68
Cuadro 10: Lecturas de carga máxima requerida en manzana a 5hrs. de proceso	69
Cuadro 11: Lecturas de carga máxima requerida en piña a 5hrs. de proceso	71

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Componentes principales de la célula vegetal	8
Figura 2: Movimiento de la molécula en la difusión	12
Figura 3: Transferencia de masa en deshidratación osmótica.	18
Figura 4: Transporte transmembranario plasmalemmático (TTP).	19
Figura 5: Transporte transmembranario simplástico (TTS).	20
Figura 6: Transporte difusional convectivo (TDC).	20
Figura 7: Representación gráfica de la definición de fuerza y dureza	31
Figura 8: Esquema del diseño de construcción de microscopios	34
Figura 9: Ejemplos de los diseños factoriales propuestos por Taguchi	37
Figura 10: Obtención de muestras en forma de placas	47
Figura 11: Celda de experimentación	48
Figura 12: Obtención del coeficiente de difusión (D)	52
Figura 13: Corridas con mayor pérdida de humedad a $0.6 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$	59
Figura 14: Corridas con humedad final a $0.40 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$	60
Figura 15: Porcentaje de contribución de las variables sobre pérdida de humedad	61
Figura 16: corridas con mayor ganancia de sólidos a $0.17 \text{ g}_s/\text{g}_{\text{tot}}$ baja humedad	62
Figura 17: Porcentaje de contribución de las variables sobre la SG	63
Figura 18: Representación grafica de los coeficientes de difusión con humedad final menor a $0.8 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$	64
Figura 19: Porcentaje de contribución de las variables sobre (D)	65
Figura 20-(A): Las dos mejores corridas en WL	66
Figura 20-(B): Las dos mejores corridas en SG	66
Figura 21: Representación grafica de la carga Vs desplazamiento en función del tiempo	72
Figura 22: Corridas con carga máxima mayor a $0.2427 \text{ KN}$ y espesor de 1 cm	73
Figura 23: Ejemplificación de células de piña con diferente corte y tiempo de proceso	74

Figura 24: Ejemplificación de células de manzana a diferentes tiempos de proceso	75
Figura 25: Ejemplificación del fenómeno de cristalización en piña	76
Figura 26: Esquematización de corte longitudinal y transversal de piña en (MEB)	77
Figura 27: Contenido de humedad en DO y secado convectivo	78
Figura 28: Carga máxima en función al proceso	80
Figura 29: Daño estructural en tejidos de piña a diferentes tiempos y diferentes procesos. Tomados en (MEB)	81

# INDICE.

Índice de Cuadros	iii
Índice de Figuras	iv
Resumen	1
Introducción	3
<b>CAPITULO1: Marco teórico</b>	
1.1 Generalidades de las frutas y su conservación	5
1.1.2 Piña ( <i>ananas comosus</i> )	9
1.1.3 Manzana ( <i>pumila</i> )	10
1.2 Generalidades de las operaciones y procesos de transferencia de masa	11
1.2.1 Mecanismos de transferencia de masa	11
1.2.2 Coeficiente de difusión y ley de Fick	13
1.2.3 Modelo del coeficiente de transferencia de masa	16
1.3 Deshidratación osmótica (DO)	17
1.3.1 Variables de proceso	21
1.3.2 Ventajas y desventajas del proceso de DO	24
1.4 Textura en los alimentos procesados	27
1.4.1 Efectos del proceso sobre la pared celular	31
1.5 Microscopía	33
1.6 Diseño de experimentos y método Taguchi	35
<b>CAPITULO2: METODOLOGÍA</b>	
2.1 Objetivos	38
2.2 Cuadro metodológico	39
2.3 Materiales y Métodos	40
2.3.1 Actividad de agua (Aw)	40
2.3.2 Contenido de sólidos	40
2.3.3 Contenido de humedad	41
2.3.4 Densidad por gravimetría	42
2.3.5 Análisis por microscópico óptico	42
2.3.6 Microscopio electrónico de barrido (MEB)	42
2.3.7 Análisis por penetración	44
2.4 Actividades preliminares	44
2.4.1 Selección de fruta	45
2.4.2 Preparación de la solución osmótica	45
2.4.3 Selección de temperatura de proceso	45
2.4.4 Determinación de la velocidad de agitación	46
2.4.5 Determinación de presión de vacío	46
2.4.6 Selección de parámetros de referencia (dulces cristalizados)	46
2.5 Preparación de muestras	47
2.5.1 Muestras en fresco	47
2.5.2 Muestras procesadas	48
2.5.3 Equipo utilizado	48
2.6 Diseño experimental	49
2.6.1 Ganancia de sólidos	50

2.6.2 Pérdida de humedad	50
2.6.3 Coeficiente de difusión	50
2.7 Análisis de resultados y selección de la mejor corrida	52
2.8 Análisis por microscópico y textural	52
2.9 Comparación del deshidratado osmotico Vs. Secado convectivo	53
<b>CAPITULO 3. RESULTADOS</b>	
3.1 Actividades preliminares	54
3.1.1 Fruta fresca	54
3.1.2 Selección de los dulces cristalizados "modelo"	54
3.1.3 Establecimiento de temperatura de proceso	56
3.2 Estudio cinético	57
3.2.1 Pérdida de humedad (WL) y humedad final	58
3.2.2 Ganancia de sólidos	61
3.2.3 Coeficiente de difusión	64
3.2.4 Comportamiento de (SG Y WL)	66
3.2.5 Niveles recomendados	67
3.3 Estudio textural y microscópico	69
3.3.1 Análisis de textura	69
3.3.2 Análisis óptico	74
3.4 Comparación de deshidratación osmótica Vs. secado convectivo	78
3.4.1 Contenido de humedad	78
3.4.2 Análisis de textura	79
3.4.3 Análisis microscópico (MEB)	81
4. Conclusiones	83
5. Recomendaciones	85
6. Anexo 1. Glosario de términos	86
7. Anexo 2. Nomenclatura	88
8. Referencias	91

## INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1: Composición química de la piña	9
Cuadro 2: Composición química de la manzana	10
Cuadro 3: Diseño experimental de L <sub>16</sub> Taguchi	49
Cuadro 4: Valores promedio obtenidos de la fruta fresca	54
Cuadro 5: Valores de referencia en producto modelo	55
Cuadro 6: Resultados obtenidos para la selección de la mayor temperatura	56
Cuadro 7: Parámetros calculados en la deshidratación osmótica	58
Cuadro 8: Niveles recomendados por el análisis de Taguchi	68
Cuadro 9: Comparación de resultados de la "mejor corrida" Vs. "ideal"	68
Cuadro 10: Lecturas de carga máxima requerida en manzana a 5hrs. de proceso	69
Cuadro 11: Lecturas de carga máxima requerida en piña a 5hrs. de proceso	71

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Componentes principales de la célula vegetal	8
Figura 2: Movimiento de la molécula en la difusión	12
Figura 3: Transferencia de masa en deshidratación osmótica.	18
Figura 4: <i>Transporte transmembranario plasmalemmático (TTP).</i>	19
Figura 5: <i>Transporte transmembranario simplástico (TTS).</i>	20
Figura 6: <i>Transporte difusional convectivo (TDC).</i>	20
Figura 7: Representación gráfica de la definición de fuerza y dureza	31
Figura 8: Esquema del diseño de construcción de microscopios	34
Figura 9: Ejemplos de los diseños factoriales propuestos por Taguchi	37
Figura 10: Obtención de muestras en forma de placas	47
Figura 11: Celda de experimentación	48
Figura 12: Obtención del coeficiente de difusión (D)	52
Figura 13: Corridas con mayor pérdida de humedad a $0.6 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$	59
Figura 14: Corridas con humedad final a $0.40 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$	60
Figura 15: Porcentaje de contribución de las variables sobre pérdida de humedad	61
Figura 16: corridas con mayor ganancia de sólidos a $0.17 \text{ g}_s/\text{g}_{\text{tot}}$ baja humedad	62
Figura 17: Porcentaje de contribución de las variables sobre la SG	63
Figura 18: Representación grafica de los coeficientes de difusión con humedad final menor a $0.8 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$	64
Figura 19: Porcentaje de contribución de las variables sobre (D)	65
Figura 20 (A): Las dos mejores corridas en WL	66
Figura 20 (B): Las dos mejores corridas en SG	66
Figura 21: Representación grafica de la carga Vs desplazamiento en función del tiempo	72
Figura 22: Corridas con carga máxima mayor a $0.2427 \text{ KN}$ y espesor de $1 \text{ cm}$	73
Figura 23: Ejemplificación de células de piña con diferente corte y tiempo de proceso	74
Figura 24: Ejemplificación de células de manzana a diferentes tiempos de	75

proceso

Figura 25: Ejemplificación del fenómeno de cristalización en piña	76
Figura 26: Esquematización de corte longitudinal y transversal de piña en (MEB)	77
Figura 27: Contenido de humedad en DO y secado convectivo	78
Figura 28: Carga máxima en función al proceso	80
Figura 29: Daño estructural en tejidos de piña a diferentes tiempos y diferentes procesos. Tomados en (MEB)	81



## RESUMEN

---

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos en la investigación realizada sobre la deshidratación osmótica de frutas mediante el estudio de la influencia de las variables más importantes reportadas por otros autores, sobre la cinética de deshidratación de piña y manzana, la textura y la calidad estructural a nivel celular de los productos elaborados mediante un proceso osmótico.

El estudio se realizó en tres etapas; en la primera etapa se llevo a cabo la experimentación con la aplicación de la metodología Taguchi a la materia prima piña y manzana con el propósito de encontrar los mejores parámetros de proceso para la obtención de una golosina deshidratada osmóticamente. Se trabajo con ocho variables en dos diferentes niveles cada una y se analizaron la ganancia de sólidos y perdida de humedad como parte de las actividades para el cumplimiento del objetivo general.

Se encontró que a concentración alta de 60 °Bx y con espesor de 1 cm se consiguen perdidas de humedad por arriba de 0.79  $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$  alcanzando una humedad final de 0.28  $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$ . La temperatura es el factor con mayor porcentaje de influencia en lo que respecta a la ganancia de sólidos obteniendo un valor de 0.25  $\text{g}_s/\text{g}_t$  a temperatura baja (20 °C). Por otro lado el coeficiente de difusión (D) se vio favorecido por sistemas agitados además de las condiciones ya mencionadas, alcanzando un valor de 1.10 E-9 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) siendo la corrida que cumplió con estas condiciones considerada como la corrida ideal.

La segunda etapa consistió en el análisis microscópico para estudiar el daño estructural a nivel celular. También se realizó un estudio de textura mediante una prueba destructiva (penetración) en el texturometro para ver los cambios en la dureza del fruto, a través de la deshidratación osmótica del mismo.

La última parte se realizó mediante la comparación de los productos obtenidos por diferentes métodos (deshidratado osmóticamente, producto comercial y

secado por convección). Se observó que la humedad final es un parámetro muy importante en cuanto al daño a nivel celular y la dureza del producto final. El método con que ésta se elimina va a repercutir directamente en el gusto del consumidor para su venta. La deshidratación osmótica fue la que mejores resultados presentó al ser observados, en comparación con el de secado convectivo, método comúnmente utilizado para la conservación de alimentos.

## INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad existe una tendencia mundial por la investigación y el desarrollo de técnicas de conservación de alimentos que permitan obtener productos de alta calidad nutricional, estos, deben ser similares en color, aroma y sabor a los alimentos frescos y deben estar preferentemente libres, de agentes químicos conservadores (Shouthgate, 1989).

Uno de los principales problemas en México es el abastecimiento de alimentos de calidad, principalmente en el caso de alimentos perecederos. Estos insumos, sufren una importante merma debido a la manipulación de la que son objeto a lo largo del trayecto desde su obtención hasta que llega al consumidor. Las razones que propician esta situación generalmente se deben a los escasos recursos económicos de los productores y/o distribuidores, además de la falta de capacitación y la abundancia de costumbres inadecuadas para su manejo.

En el caso de las frutas y verduras existen grandes mermas en el campo, las operaciones poscosecha, el transporte, el almacenamiento y la manipulación, son las principales causas de pérdida en alimentos. En México, se aprovechan sólo 89.7% de las frutas y verduras que se cosechan en el territorio nacional y el restante 10.3% corresponde a la ración de desperdicio, esta equivale a aproximadamente millón y medio de toneladas de fruta. Cabe resaltar que la fruta que no está en condiciones de venderse "en fresco" no deja de ser consumible, ya que estos productos sometidos a un proceso de transformación pueden ser aprovechados de otra manera.

México produce alrededor de 40 productos agrícolas con una producción anual superior a las 100,000 toneladas métricas y otros 60 productos con producciones mayores a 50,000 toneladas métricas anuales, esto gracias a que en el territorio nacional se puede encontrar una variabilidad muy extensa en cuanto a clima y a suelo se refiere, este factor hace que en México se logre sembrar y cosechar exitosamente el 85% de lo que se desea producir (FAO, 1993).

Dado al mal aprovechamiento de recursos que tenemos en México, se tiene la necesidad de buscar formas alternativas para evitarlo, el camino mas prometedor es reducir estas mermas y que ese producto sean aprovechados por los productores con técnicas fáciles y económicas que le den un valor agregado al producto y que a su vez alarguen la vida útil del mismo.

El procesado de alimentos es una de las formas mas convenientes de alargar su vida útil logrando así tenerlos disponibles por mucho mas tiempo, aun aquellos que resultan ser de temporada.

Alrededor del mundo se acostumbra utilizar diversos métodos de conservación, uno de los que recientemente se esta utilizando e investigando es la Deshidratación Osmótica, proceso mediante el cual se lleva a cabo una deshidratación parcial del alimento haciendo una sustitución de humedad por sólidos disueltos, logrando con esto una disminución muy notable de la actividad de agua del alimento, con lo cual se obtiene un aumento considerable en la vida útil del mismo y reduciendo las perdidas por mal aprovechamiento.

En este trabajo se presenta como una opción fácil de procesamiento de frutos el empleo de la Deshidratación Osmótica (DO), generalmente aplicable en la mayoría de las frutas que pueden ser rebanadas. Esta operación es muy versátil ya que además de servir para alargar la vida útil del alimento puede ayudar a obtener productos finales los cuales, con la pequeña adición de un componente o ingrediente extra, resultan ser golosinas sabrosas, saludables y de elaboración muy económica.



## CAPITULO 1: MARCO TEORICO

---

### 1.1. GENERALIDADES DE LAS FRUTAS Y SU CONSERVACIÓN.

En la actualidad existe la necesidad de buscar alternativas que ayuden a evitar el desperdicio de recursos. Una de ellas corresponde a la selección poscosecha de los productos destinados para la venta en fresco, la cual pretende reunir las características de apariencia necesarias para la oferta de productos atractivos al consumidor. El resto de los productos, que no cumplen con las características para su venta en fresco, en lugar de ser parte de las altas tasas de desperdicio, tendrían que ser aprovechados por el productor. En este sentido, el productor puede consumir sus productos (autoconsumo) o bien, someterlos a una transformación mediante técnicas sencillas y económicas que permitan alargar la vida útil del producto y le confieran un valor agregado.

Los procesos de conservación de alimentos han acompañado al hombre desde tiempos muy remotos, reforzando su disponibilidad por un lapso mayor, lo que ha permitido que en la actualidad se cuente con un mercado diverso en productos procesados. La aplicación de técnicas de conservación ha aportado una gran variedad de métodos que permiten conseguirla, tal evolución ha resultado en la obtención de productos de calidad creciente.

Desde la antigüedad el hombre buscó la manera de conservar por más tiempo sus alimentos. Ante tal necesidad, el descubrimiento del fuego fue una herramienta importante para trascender en dicho escenario, pues a partir de este momento el ser humano comenzó a cocinar sus alimentos y por este medio, los alimentos disminuían su contenido microbiológico drásticamente, se hacían mas fáciles de digerir y comenzaban a adquirir un sabor diferente, sabor con el cual los conocemos actualmente (Badui, 1981; judaísmovirtual (12/03)).

En el siglo XVIII ó XIX se comenzó a recurrir a técnicas más complejas para conservar los alimentos, en la actualidad dichas técnicas son muy utilizadas:

- Agua / hielo            para            Enfriar / congelar
- Sol / aire                para            Deshidratar
- Sal                        para            Salar / deshidratar

En el norte de Europa, en las regiones alpinas, había depósitos de hielo y nieve que eran ocupados para la conservación de alimentos, principalmente carne ([WWW.Cookaround.com](http://WWW.Cookaround.com) (12/03)).

Hacia el año 1795 el francés Nicolás Appert inventó los frascos para conservas. Su proceso consistía en calentar el contenido de los frascos por unos minutos y después taparlos herméticamente con corchos encerados. Este método fue muy utilizado, hasta que en 1812 la empresa inglesa Donkin Hall and Gamble perfeccionó tal método sustituyendo los frascos por latas metálicas similares a las que conocemos en nuestros días ([judaísmovirtual.com](http://judaísmovirtual.com) (12/03)).

La deshidratación es uno de los principales métodos de conservación que se aplica a las frutas puesto que es posible controlar su vulnerabilidad causada por el alto contenido de agua. Cuando se deshidrata un alimento, no sólo se disminuye su contenido de agua sino que se disminuye su biodisponibilidad. Una forma de expresar esta disponibilidad es mediante el término actividad de agua ( $A_w$ ).

La  $A_w$  se representa como la relación de presión de vapor de agua disponible de un material (que puede ser un alimento), sobre la presión de vapor del agua pura, ambos a la misma temperatura, como se indica a continuación ([virtual.unal.edu](http://virtual.unal.edu)(12/03))

$$A_w = \frac{P_{v_{Alimento}}}{P_{v_{H_2O}}} \quad (1)$$

Donde:

$A_w$ = Actividad de agua.

$P_{v_{Alimento}}$  = Presión de vapor del alimento.

$P_{v_{H_2O}}$  = Presión de vapor del agua pura.

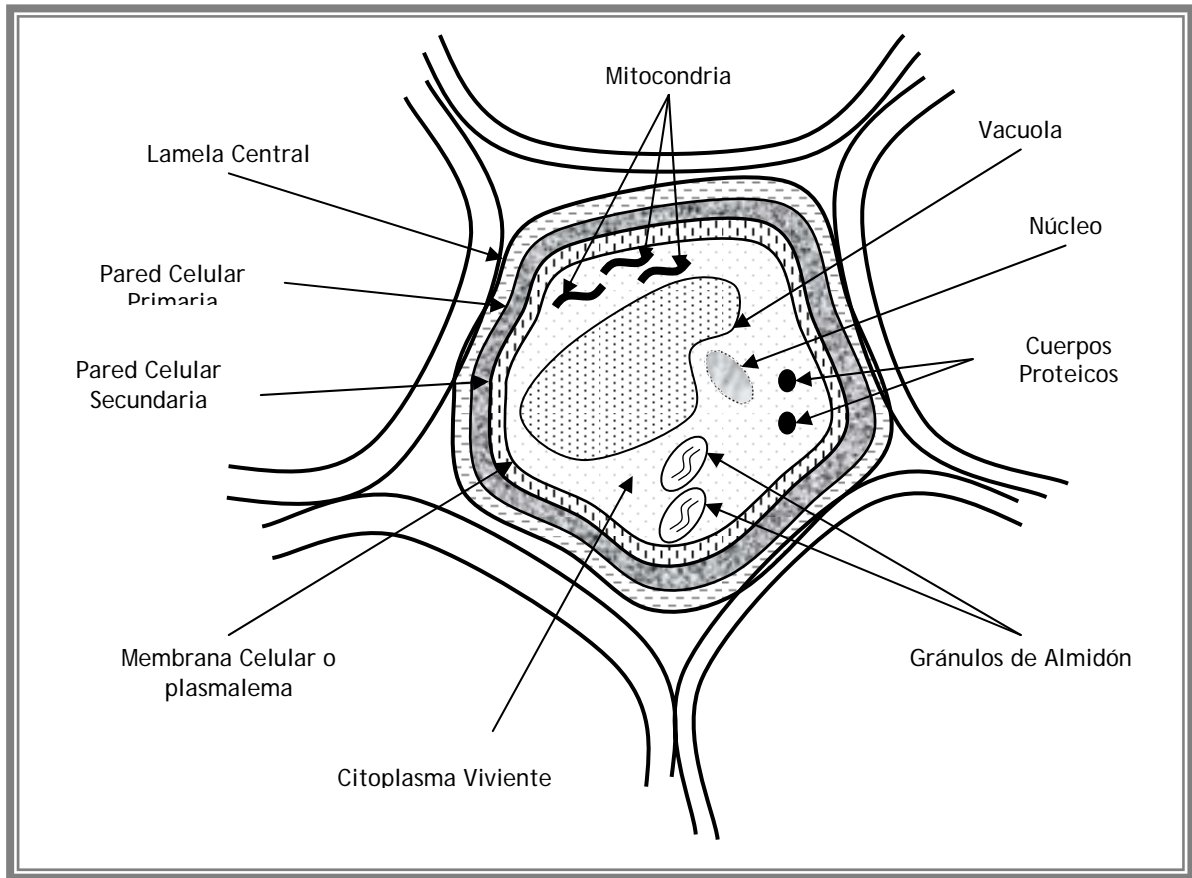
El valor de  $A_w$  disminuye cuando se disuelven algunas sustancias en agua pura, de igual forma, cuando a un alimento se le retira parte del agua, su  $A_w$  también disminuye. Si esta disminución representa un porcentaje elevado, el alimento adquiere un valor de  $A_w$  relativamente bajo y se le podrá denominar alimento de humedad intermedia (AHI) que va de 0.8 a 0.25 de su  $A_w$ , por arriba y por debajo de este valor se encuentran los alimentos con  $A_w$  alta y baja respectivamente (Badui, 1981).

El aspecto más importante para lograr una adecuada conservación de los alimentos, es conocer la distribución del agua dentro de éste, ya que dicha distribución no es uniforme. Principalmente en los frutos, las macromoléculas y componentes estructurales presentan afinidad por las moléculas de agua, la cantidad de agua varía según la composición del sitio en estudio, de esta manera, el agua libre cuantificada en la cutícula es muy diferente en cantidad a la encontrada en el mesocarpio y así sucesivamente (virtual.unal.edu(12/03)).

Las frutas y hortalizas presentan una amplia gama de tejidos diferentes, cada uno de estos tejidos a su vez esta compuesto de un gran número de células de estructura similar. Sus características más importantes son el alto contenido de agua, azúcares y compuestos aromáticos.

Los tejidos de las frutas y hortalizas varían considerablemente de acuerdo a la parte de la planta. Ya que todos los organismos vivos están compuestos por células, cada célula está compuesta por un protoplasto vivo limitado por una frágil membrana permeable que a su vez es muy selectiva y es denominada plasmalema. En la Figura 1 se presentan los compuestos estructurales de las células vegetales donde se observa que el protoplasto contiene el citoplasma de la célula en el que se encuentran contenidos el núcleo, las mitocondrias, la vacuola celular y otros organelos; la plasmalema esta rodeada por una pared compuesta de fibras de celulosa y hemicelulosa en una compleja matriz de agua y pectina, esta mezcla ayuda a fijar las paredes celulares vecinas cimentándolas unas junto a otras. Esta es una característica que define al reino vegetal (Rosenthal, 2001).





*Figura 1: Componentes principales de una célula vegetal (Rosenthal, (2001)*

Los alimentos de origen vegetal han sido desde siempre una fuente importante de nutrimentos para los seres humanos y los animales, estos alimentos aportan los carbohidratos necesarios en la dieta diaria, tal es el caso de los azúcares, los almidones y la fibra (Romojaro, 1996). Los vegetales se clasifican en diferentes niveles de perechibilidad, generalmente por su contenido de agua y sus características de acidez. Entre más agua posean y el pH es más cercano a la neutralidad, son más propensos al rápido deterioro, sobre todo por causa de origen microbiológico, ya que el contenido de agua en las frutas es cercano al 95% y el pH oscila entre 2.5 a 4.5. La perechibilidad de las frutas se debe a su contenido de agua y a los sólidos solubles que estos contienen, entre 6 y 25% de azúcar (expresado en sacarosa) (Soroa, 1965).

### 1.1.2 Piña (Ananas comosus)

La piña es un fruto tropical que llega a pesar de uno a cuatro kilogramos (dependiendo la variedad), los tejidos de la piña son firmes, de color amarillo pálido y su sabor es una mezcla de suavidad y acidez. Las principales variedades de este fruto son Smoot cayena, Kew, Roja Española y Queen. Su composición química se describe en el Cuadro 1. Una considerable cantidad de la piña se consume en fresco aunque también se enlata, ya sea rebanada o en jugo. En un grado más limitado se conserva por congelación

Los principales países productores son China, EEUU, Brasil, Tailandia, Filipinas y México. La producción mundial de la piña se duplicó entre 1948 y 1965 y desde entonces se halla en rápido aumento. Al margen de su importancia como fruto, el ananás se ha venido también cultivando desde hace tiempo como planta de fibra.

El cultivo de la piña es rentable en las diferentes regiones productoras, ya que las relaciones costo-beneficio obtenidas son mayores a uno y la cantidad de producción mínima económica es menor a la cantidad de producción efectiva. En México los estados principales productores de piña son Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Nayarit con una producción aproximada de 15,123 hectáreas en el 2006 (fao.org 1993; chapingo.mx/investigacion/pronisea/2003.html; ww.inegi.gob.mx/agronomia/2006).

*Cuadro 1: Composición química de la piña por 100 gr. de porción comestible.*

Agua	83.8 gr
Proteína	0.5 gr
Grasa	0.1 gr
Carbohidratos	12.4 g
Azúcares totales	10.1 g
Grasas saturadas	Trazas
Grasas moninsaturadas	0.1 g
Grasas polinsaturadas	0.1 g
Ácidos orgánicos	0.7 g
Fibra dietética	1.3 g
Sales minerales	0.4 g

(SENER, 1999; WWW.AGROINFO.COM/FRUTAS, 2002)

### 1.1.3 Manzana (Malus pumila)

Es un pomo que consiste en tejidos firmes, jugosos y frescos que rodean al corazón, el cual contiene de 4 a 8 semillas. Alrededor del mundo se conocen aproximadamente 7,500 variedades de este fruto cuyo tamaño, textura, color y aroma cambian de una variedad a otra. La composición química de este fruto se describe en el Cuadro 2.

La manzana es una de las especies de fruta dulce de mayor difusión a escala mundial, debido fundamentalmente a su facilidad de adaptación a diferentes climas y suelos, a su valor alimenticio y terapéutico y principalmente a la calidad y diversidad de productos que se obtienen en la industria transformadora. Este fruto se procesa principalmente para la obtención de conservas, frutas deshidratadas y congeladas, vinagre, sidra y jugos, (Ensminger, 1993).

*Cuadro 2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MANZANA POR 100 GR. DE PORCIÓN COMESTIBLE.*

Agua	84 g
Proteína	0.3 g
Grasa	0.6 g
Carbohidratos	15 g
Ácidos orgánicos	0.6 g
Fibra	2.3 g
Sales minerales	0.3 g
Glucosa	2.210 mg
Fructosa	6.040 mg
Sacarosa	2.470 mg
Almidon	600 mg
Sorbitol	510 mg

(Senser, 1999; [www.agroinfo.com/frutas](http://www.agroinfo.com/frutas), 2002)

En México el principal productor es el estado de Chihuahua con cifras cercanas a las 59,842 hectáreas sembradas en 2006, el rendimiento de esta fruta es de aproximadamente 25 ton/ha. Con esto, Chihuahua contribuye con casi el 33.6 % de la producción nacional de diferentes variedades de manzana. ([www.inegi.gob.mx/agronomia/2006](http://www.inegi.gob.mx/agronomia/2006); [www.cideiber.com/infopaises/Mexico/Mexico-04-01.html](http://www.cideiber.com/infopaises/Mexico/Mexico-04-01.html)).

## 1.2. GENERALIDADES DE LAS OPERACIONES Y PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE MASA.

En muchas áreas de la industria química y de la ingeniería, existen diferentes operaciones unitarias en las que tiene lugar la transferencia de masa. Estas operaciones se dan dentro de los procesos productivos en diferentes condiciones de presión, temperatura e incluso en diferentes estados físicos de la materia, como por ejemplo; la transferencia entre compuestos líquido-líquido, gas-líquido, gas-sólido, sólido-líquido, gas-gas, además estas mezclas pueden ser o no miscibles. Y todos ellos están regidos al igual que las operaciones de transferencia de calor y momento lineal, por una fuerza impulsora que en este caso es el gradiente de concentración entre dos puntos. En la industria alimentaria, la transferencia de masa es también una herramienta para la conservación de alimentos (Carrera, 1994; Geankoplis, 1998)

Una de las operaciones importantes es el secado o desorción el cual ocurre cuando se pone en contacto un sólido húmedo que tiene un compuesto volátil (por lo general agua), con una fase gaseosa relativamente seca, donde parte del agua abandona el sólido transfiriéndose a la fase gaseosa. En esta operación además de agua, se pueden perder otros componentes.

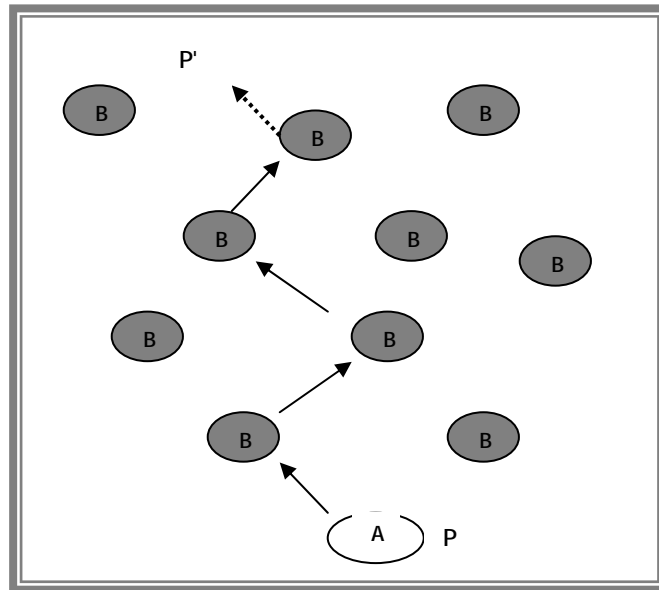
La deshidratación osmótica de alimentos es una operación que en los últimos años ha venido tomando gran auge debido a las ventajas que presenta en los productos finales. Esta operación se basa en el contacto de un sólido con una solución que tiene una mayor presión osmótica y la transferencia se da mediante la migración de los solutos de la solución que entran al sólido.

### 1.2.1. Mecanismos de transferencia de masa

Los mecanismos por los cuales se lleva a cabo la transferencia de masa son: la difusión, que se origina por un gradiente de concentración, y la convección que se origina mediante el movimiento de una sustancia fluente (Lobo, 1997).

La difusión es un proceso lento originado por un gradiente de concentración. El fenómeno se ilustra en la Figura 2, en la cual las moléculas de la sustancia

denominada "A" se desplaza de manera individual en línea recta a través de otra sustancia denominada "B". Como se puede observar en la figura la molécula "A" viaja a velocidad constante, al chocar con las moléculas "B" esta cambia su velocidad, dirección y magnitud dando lugar realmente a un viaje en zig - zag, por lo que la distancia neta recorrida por la molécula entre dos puntos dados es mucho mayor que la que existe entre ambos puntos (Treybal, 1988; Lobo, 1997; Geankoplis, 1998).



*Figura 2: Movimiento de las moléculas en el fenómeno de difusión*

Diversos autores explican, en el aspecto termodinámico, que la velocidad de las moléculas depende de su energía cinética, la cual se ve afectada por la temperatura, por lo tanto, a mayor temperatura mayor velocidad. Por otro lado, el número de colisiones esta relacionado con la presión, de tal manera que a mayor presión mayor numero de colisiones. Esto permite ver que si se quiere mejorar la rapidez de difusión de los procesos, éstos tienen que llevarse a cabo a altas temperaturas y bajas presiones. Debido al estado de agregación de la materia, la difusión en sólidos es más lenta que en líquidos y esta a su vez es más lenta que en gases, ya que las moléculas en este ultimo caso se encuentran más dispersas (Lobo 1997).

Por otro lado, la convección es un mecanismo originado por el movimiento masivo de una sustancia fluente y puede darse de dos modos, de forma natural y de forma

forzada. En la convección natural el movimiento del fluido sucede como resultado de la diferencia de densidad y concentración que se establecen en su interior. A diferencia de este mecanismo, en la convección forzada la velocidad del fluido es originada debido a la acción de una fuerza externa.

Los mecanismos de transferencia de masa (difusión y convección) ocurren simultáneamente, aunque algunas veces predomina uno de ellos y en otras ocasiones tienen el mismo orden de importancia. Cuando las soluciones son diluidas y mantienen una densidad constante, el fenómeno dominante es la difusión. Cuando las soluciones son concentradas, el análisis del fenómeno se complica puesto que ambos mecanismos tienen el mismo orden de importancia.

Así, la importancia relativa en capacidad difusiva o convectiva de un proceso dependerá de la magnitud de la concentración del soluto y de la diferencia de concentraciones. El proceso difusivo ocurre a distancias cortas, es decir, a escala molecular, mientras que la convección se da a distancias más grandes, siendo por lo tanto un proceso macroscópico (Lobo, 1997).

### **1.2.2. Coeficiente de difusión y ley de Fick**

La ley de Fick nos permite, en conjunto con los balances de materia, conocer el flux<sup>1</sup> difusivo. Para poder explicar cuantitativamente el proceso de la difusión de una sustancia en otra se tiene que utilizar una medida apropiada de la rapidez de transferencia y ésta puede escribirse adecuadamente en función del flujo molar o flux, el cual nos ayudará a cuantificar la difusión en términos de variables que se pueda medir en cada punto del sistema.

Se hace necesario entonces el uso de fluxes, para describir el movimiento de un componente "N" que es el flux relacionado con un lugar fijo en el espacio y "J", el flux de un compuesto con relación a la velocidad molar promedio de todos los componentes el cual es característico de la naturaleza del componente (Treybal, 1988).

---

<sup>1</sup> Flux se define como la cantidad de materia transferida en un área definida por unidad de tiempo.

Fick reconoció que la difusión de masa sigue la misma ley de la difusión de calor de Fourier y de flujo de electricidad de Ohm, la cual es aplicable a soluciones diluidas de densidad constante. La ecuación relaciona el flux difusivo con el gradiente de concentración mediante una constante de proporcionalidad, que es una propiedad del sistema en estudio y que se denomina coeficiente de difusión. Matemáticamente la ley de Fick se puede expresar como lo muestra la siguiente ecuación unidireccionalmente.

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz} \quad (2)$$

En donde:

$J_A$  = Flux difusivo (kg mol/s\*m<sup>2</sup>).

$dc_A$  = La diferencia de concentraciones entre dos puntos (kg mol/m<sup>3</sup>).

$dz$  = La dirección en la que se da la difusión (m).

$D_{AB}$  = Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s)

Así, la difusividad o coeficiente de difusión,  $D_{AB}$  de un componente A en solución B (que es una medida de la movilidad de difusión), se define como la relación de su flux ( $J_A$ ) y su gradiente de concentración. El signo negativo significa que existe un decremento de concentración en la solución, por lo tanto el flux en el material es positivo. Si la concentración en el material aumentara, el coeficiente de difusión sería positivo y el flux, por tanto, negativo.

Físicamente la ley de Fick establece que existe una tendencia natural para que cualquier soluto se difunda de una región de alta concentración a otra de baja concentración y que esta tendencia depende de la naturaleza de la mezcla. Dicha tendencia se denomina coeficiente de difusión; por otro lado, el flux difusivo es directamente proporcional a la magnitud del gradiente de concentración (Lobo, 1997).

Hasta ahora sólo se ha descrito la ley de Fick para soluciones diluidas de densidad constante, sin embargo existen formas de la ley de Fick más generales que pueden ser aplicables a una amplia gama de problemas prácticos.

La difusión en sólidos porosos es la más abordada y se considera ordinaria ya que en ningún sólido la difusión es tan sencilla como en los gases y los líquidos, esto es debido a que la difusión generalmente ocurre cuando el diámetro del poro del material es grande, en comparación con el tamaño de las moléculas de gas o solución a difundirse.

Se ha encontrado que la difusión en la superficie de materiales porosos es la más difícil de caracterizar; las moléculas son adsorbidas en la superficie del material y son transportadas subsecuentemente de un lado a otro cambiando de dirección en función al decremento de concentración (Hines et al, 1985; Treybal1988).

La ley de Fick para la difusión puede aplicarse en muchos casos, principalmente para los casos en que la difusividad es independiente a la concentración y donde no hay flujo por convección natural:

$$N_A = D_A \frac{dC_A}{dz} \quad (3)$$

Si  $D_A = \text{cte.}$

$$N_A = -D_A \frac{dC_A}{dC_Z} \quad (4)$$

Entonces:

$$N_A = \frac{D_A (C_{A1} - C_{A2})}{Z} \quad (5)$$

El movimiento del soluto puede ser por difusión de una parte del fluido a otra en virtud de una diferencia de concentración, también puede ser hidrodinámico como resultado de una diferencia de presión. El movimiento hacia adentro y afuera del soluto se realiza únicamente por difusión. Los poros en los sólidos generalmente están interconectados entre si, por lo que el fluido los puede alcanzar por los dos lados del poro (Treybal, 1988; Cussler, 1984).



### 1.2.3. Modelo del coeficiente de transferencia de masa.

En muchos de los problemas de transferencia de masa no es posible calcular el coeficiente de difusión, ni el perfil de concentración debido a factores tales como: la velocidad del fluido en la cercanía del material y la distancia en la que ocurre el fenómeno de transferencia. Para tales casos, el modelo de transferencia de masa es útil (Lobo 1997).

El coeficiente de transferencia de masa se calcula suponiendo que la concentración de soluto entre el fluido que toca la superficie del material y la concentración promedio obtenida experimentalmente **son proporcionales**, además de ser proporcional al área del mismo. Si esto se enuncia matemáticamente queda la siguiente expresión:

$$WA = K\Delta C_A = K(C_1 - C_2)A_s \quad (6)$$

Donde:

WA = Cantidad total de soluto que se disuelve por unidad de tiempo.

$\Delta C_A$  = Concentración.

**$A_s$  = Área del soluto.**

K es una constante de proporcionalidad que se denomina coeficiente de transferencia de masa, que al dividirlo entre el área se obtiene el flux. Entonces la ecuación anterior resulta como sigue:

$$\frac{W_A}{A} = N_A = K\Delta C = K(C_{A1} - C_{A2}) \quad (7)$$

Donde:

$N_A$  = Flux total de transferencia de masa ( $N_A$  = flux difusivo + flux convectivo)

Resumiendo ambos modelos, el modelo de la ley de Fick establece que el flux es proporcional al gradiente de concentración, mientras que el modelo del coeficiente de transferencia de masa establece que el flux es proporcional a la diferencia de concentraciones (Treybal, 1988).

### 1.3 DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

La deshidratación osmótica es una técnica relativamente nueva, ya que a pesar de ser conocida desde hace muchos años el acercamiento a su estudio y de las variables que influyen en el fenómeno se ha desarrollado fuertemente en las últimas décadas.

Comúnmente se aplica para optimizar la calidad y estabilidad de frutas y hortalizas mejorando las propiedades organolépticas sin tener grandes pérdidas en compuestos aromáticos. Se ha demostrado que esta operación tiene la versatilidad de obtener productos finales, o puede ser utilizada como una operación previa a procesos como el secado y la liofilización disminuyendo los costos energéticos (Sharma, 2003; Moreira et al, 2003; Rastogui et al, 2002; Kaymak, et al, 2000).

Barbosa (2000) define a la deshidratación osmótica como un tratamiento de eliminación de agua mediante el cual se sumerge la materia prima (generalmente un alimento frutihortícola) a una solución hiper o hipotónica<sup>2</sup> en la cual se presenta un gradiente de concentraciones, de este modo se logra la transferencia de masa desde la región de mayor concentración hacia la de menor concentración.

Para entender el fenómeno de la deshidratación osmótica es importante conocer algunos conceptos fundamentales en la operación tales como presión osmótica y la ósmosis.

La presión osmótica se define como aquella que ejercen las moléculas del soluto o cuerpo disuelto, a causa de sus incesantes movimientos (Campillo, 1991). Con esto se deduce que a mayor concentración de solutos en un espacio (por ejemplo una célula), la presión osmótica será mayor, es decir su capacidad de absorber agua de la solución más diluida será mayor, o bien mayor será su capacidad de ceder agua a la solución más concentrada.

La ósmosis o el fenómeno osmótico consiste en el movimiento molecular de ciertos componentes que se encuentran en una zona de alta concentración a otra zona de

---

<sup>2</sup> Solución hipertónica es aquella que tiene una concentración de sólidos solubles superior a la del alimento. (Collocott, 1979 )  
Solución hipotónica es aquella que tiene una concentración de sólidos solubles inferior a la del alimento.

baja concentración a través de una membrana, que es la membrana de cada una de las células que componen el tejido del alimento. Por lo tanto, la velocidad de penetración estará en función de la diferencia de concentraciones y del peso molecular de la solución. Mientras mas pequeña sea la molécula del soluto, tendrá mayor poder de penetración (Sharma, 2003; Barbosa, 2000).

La ósmosis directa es una técnica que permite concentrar alimentos sólidos a temperatura ambiente, esto permite la eliminación o remoción parcial de agua (sin cambio de fase) al ser sumergidos en soluciones concentradas de azúcar que tienen una alta presión osmótica y baja actividad de agua las cuales son la fuerza impulsora para que el agua del alimento sea eliminada, originándose así dos fluxes simultáneos a contracorriente que están en función de sus potenciales químicos. Por el fenómeno de ósmosis el agua sale de las células, la fruta concentra los solutos y el jarabe se diluye progresivamente con el agua y algunos compuestos solubles capaces de salir de la célula a través de la membrana celular.

La Figura 3 muestra los fluxes a contracorriente que suelen presentarse en un sistema, en función a su  $A_w$ . La transferencia de masa se da del lugar de donde la  $A_w$  es menor hacia la región de mayor  $A_w$ . Como se puede ver en esta misma figura, se muestra que la actividad de agua de la solución es mucho menor que la del alimento ( $A_{w_s} \ll A_{w_a}$ ) (Barbosa, 2000).

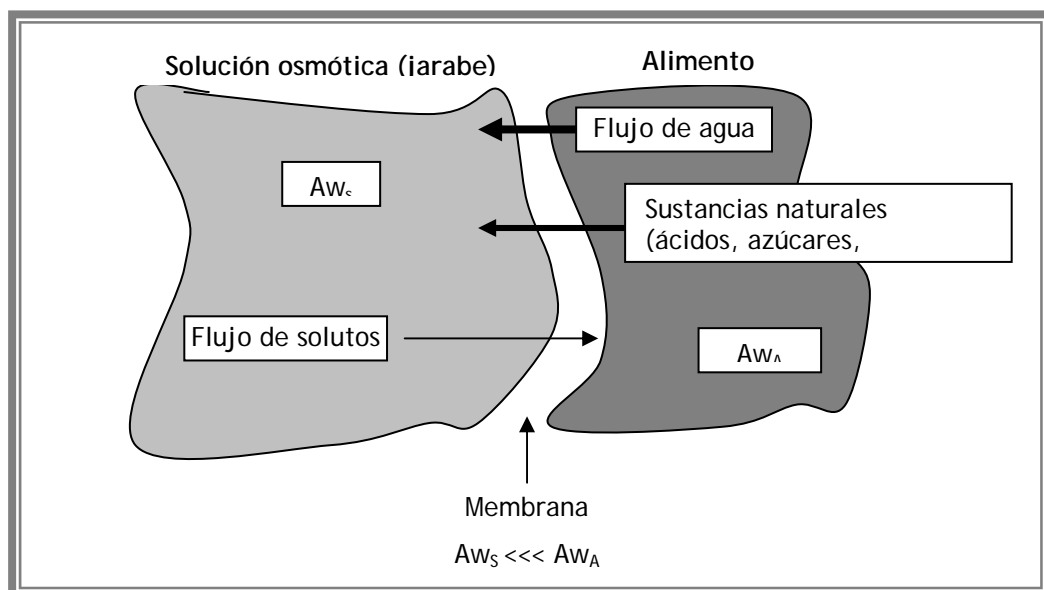


Figura 3: Transferencia de materia en la deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica se emplea principalmente en frutas y hortalizas que posee elementos favorables que permitan inducir la velocidad del fenómeno, especialmente que su estructura celular sea rígida y dentro de ella se encuentre el jugo (agua, ácidos, pigmentos, azúcares, minerales, vitaminas, volátiles, etc.), este jugo se requiere que sea una solución acuosa diluida con sólidos disueltos que oscilen entre 15 y 18% de concentración (www.virtual.unal.edu.com).

En la deshidratación osmótica se lleva a cabo una doble transferencia de masa, en primer lugar el fenómeno sucede desde la materia prima hacia el exterior como jugo y, en segundo lugar, hacia el interior de la materia prima como sólidos en solución. De este modo se pierde agua, se ganan sólidos solubles y se reduce el volumen, por lo que la materia prima sufre una depresión acuosa.

En los productos deshidratados osmóticamente, la principal barrera a la transferencia de masa (debido a la composición, características y morfología de los mismos) se localiza en la membrana celular. Dicha membrana es un componente semipermeable que sólo permite la transferencia de agua, sales, y azúcares naturales (glucosa y fructosa), hacia los espacios extracelulares o hacia una célula adyacente. Este fenómeno recibe el nombre de transporte transmembranario plasmalemmático (TTP) y transporte transmembranario simplástico (TTS). Como se muestra en las Figuras 4 y 5 (Spiazzi, et al, 2001).

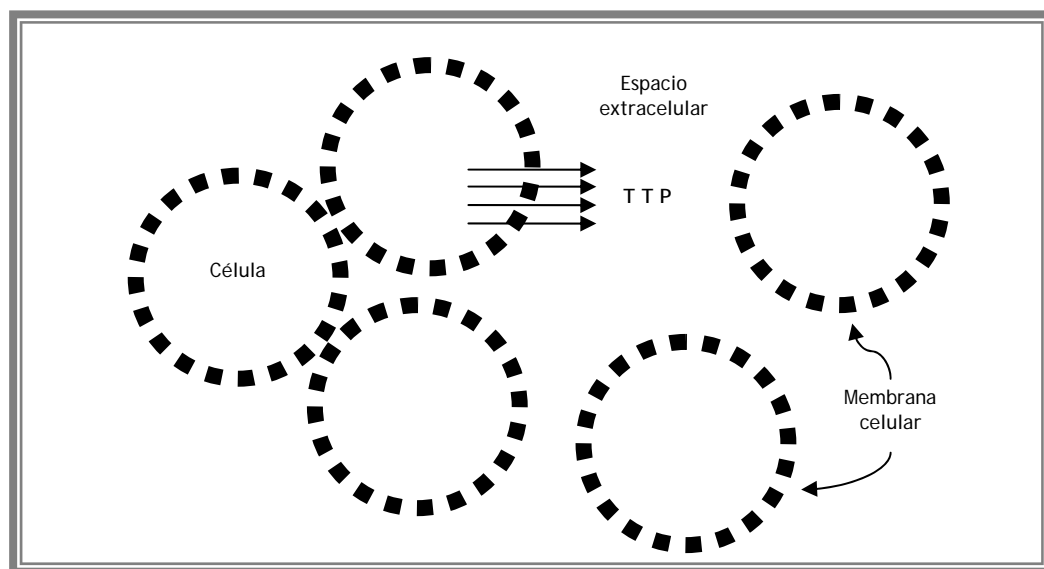
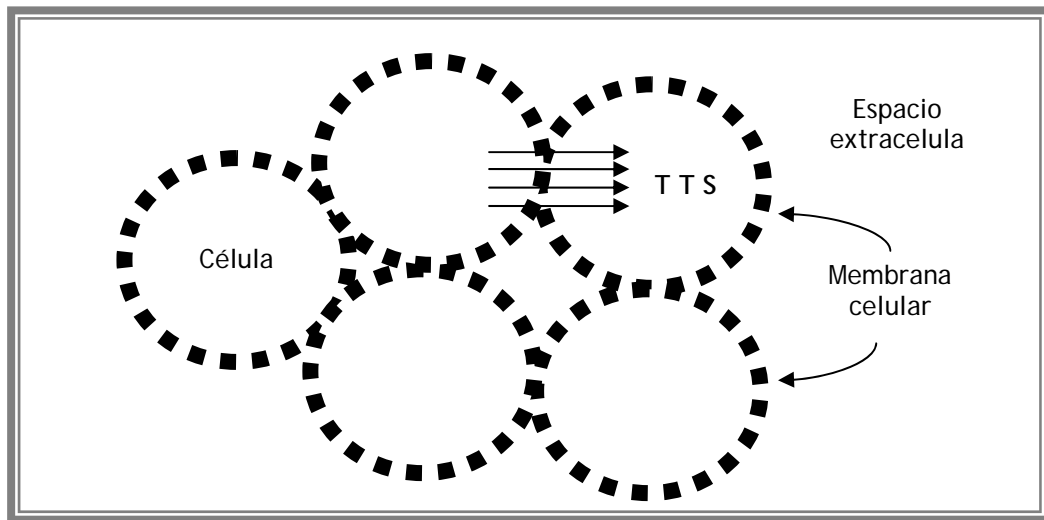
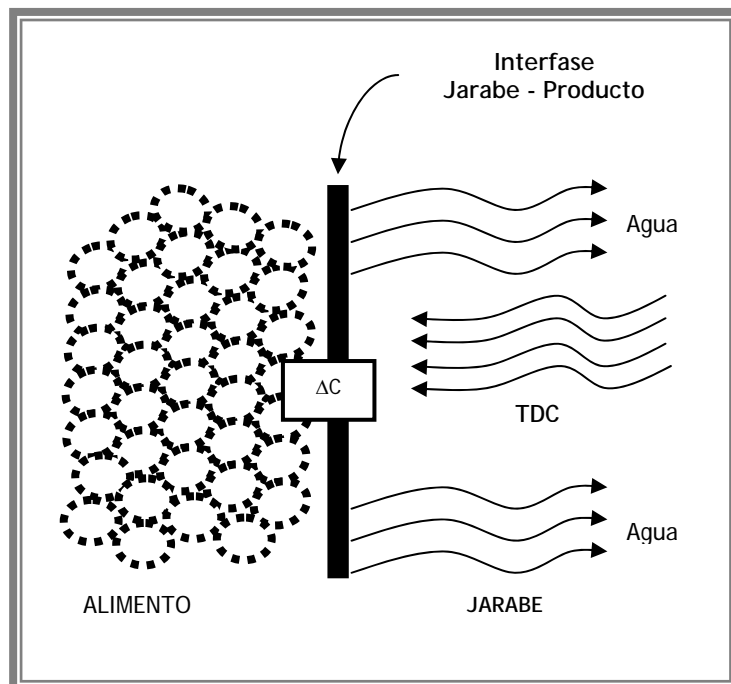


Figura 4. Transporte transmembranario plasmalemmático (TTP).



*Figura 5: Transporte transmembranario simplástico (TTS).*

Donde además de los mecanismos de transporte ya mencionados, existe otro mecanismo el cual se da una vez que el agua ha llegado al espacio extracelular donde se transfiere hacia la solución, entonces ésta hace una transferencia “de compensación” de solutos hacia el producto mediante un mecanismo similar pero en sentido inverso, a este mecanismo se le designa transporte difusional convectivo (TDC) como se muestra en la Figura 6 en el cual debido a una diferencia de concentraciones hay salida de jugo (agua y otras sustancias biológicas) disminuyendo el contenido de agua libre en el alimento (Spiazzi et al, 2001).



*FIGURA 6: Transporte difusional convectivo (TDC).*

Estudios previos han demostrado que la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica depende de ciertos factores físicos en el tejido del alimento, de tal manera que las propiedades físicas principales en este fenómeno son masa, densidad y porosidad, las cuales se ven afectadas por la geometría, el método utilizado para el muestreo y las condiciones experimentales. También se observó que las propiedades de textura muestran un incremento en la plasticidad del tejido.

### 1.3.1. Variables del proceso.

Para que un proceso de cualquier índole pueda ser considerado como eficiente no necesariamente debe alcanzar los valores más altos; sino aquel que nos permita obtener un producto con la mejor calidad posible reduciendo a máximo las pérdidas. En el caso de la deshidratación osmótica se habla de eficiencia al lograr una tasa de pérdida de humedad o ganancia de sólidos elevada en el menor tiempo, con la mayor calidad posible. Los procesos eficientes siempre buscan satisfacer los fines para los que están diseñados de la mejor manera, en el menor costo y tiempo posible. En lo que respecta a la deshidratación osmótica, las variables han sido estudiadas extensamente, dentro de las principales variables podemos citar: (Moreira, 2003; Kaymak et al, 2000).

- Concentración de la solución.
- Tipo de soluto.
- Temperatura del medio y/o de la solución.
- Presión del sistema (atmósfera).
- Tiempos de residencia.
- Geometría del producto.
- Tipo de tejido del producto.
- Disposición de tejidos (preparativos para proceso).
- Presencia de agitación en la solución.
- Espesor de la materia prima a procesar (producto).

Gracias a todos los estudios realizados de manera individual de todas y cada una de las variables, se ha visto que todas ellas contribuyen a la velocidad de transferencia de masa y tienen una influencia determinante en el color, olor y textura del producto final (Kaymak et al, 2000).

Todos los estudios referentes a la deshidratación osmótica marcan la concentración del jarabe como la variable principal en la cinética y el proceso de transferencia de masa en general, ya que influye directamente en la velocidad de deshidratación al mantener un alto gradiente de concentraciones por ambos lados de la membrana, lo que hace que se incremente más la presión osmótica. Esto favorece el flujo rápido de agua hasta llegar al equilibrio, lo que provoca un aumento en la velocidad de transferencia.

El aumento de la temperatura en el sistema produce cambios en la permeabilidad de la membrana celular y en la fluidez del jarabe. El aumento de la permeabilidad provoca una mayor velocidad de deshidratación, ya que a temperaturas altas existe un hinchamiento del tejido y aumenta la plasticidad de la membrana celular. El aumento de la temperatura del sistema favorece la eliminación del agua debido a la mayor movilidad de las moléculas y a la pérdida de la selectividad de la membrana lo que permite un mayor intercambio de agua así como un mayor ingreso de solutos, esto, reforzado por el hecho de que ahora existe contacto más íntimo de la membrana celular con el jarabe el cual se ha hecho menos viscoso<sup>3</sup> por acción del calor (Mafart, 1994).

Debido a lo anterior la temperatura es un factor crítico en el proceso que afecta la ganancia de sólidos y por lo tanto la pérdida de agua, así como la difusión de aromas hacia la solución y el proceso de ósmosis en general (Contreras et al, 1998).

El tipo de jarabe es otro de los factores que influyen directamente en la velocidad de deshidratación debido a sus características. La composición es el factor de mayor importancia en el jarabe y uno de los principales criterios de selección ya que de

---

<sup>3</sup> la viscosidad es la fuerza de cohesión de un fluido, es decir es la resistencia que se opone al desplazamiento

esta dependerá el costo y la eficiencia del jarabe, los sólidos empleados son buscados con base en la naturaleza química de los componentes utilizados para la elaboración del jarabe, ya que cada jarabe ejerce una presión osmótica distinta.

El peso molecular y el tamaño de los sólidos que sirven de base para la elaboración del jarabe son muy importantes ya que se alcanza mayor tasa de penetración de sólidos en los materiales con solutos de bajo peso molecular. Por otro lado, como la membrana celular es parcialmente selectiva, los primeros compuestos que se difunden de una zona a otra de la membrana son el agua y las moléculas de bajo peso molecular.

En el proceso de deshidratación osmótica se han encontrado resultados adecuados cuando se aplica una disminución en la presión atmosférica mediante la utilización de vacío atmosférico en el sistema (Contreras, 1998; Serra, 1998; Mújica et al, 2003). Esta técnica acentúa el proceso de transferencia de masa ya que permite remover los gases atrapados dentro de los tejidos porque estos representan una barrera para la deshidratación pues la transferencia de masa sólido-gas no es posible a niveles de medición macroscópico.

La disminución de la presión permite una salida más rápida del agua ya que se elimina el aire ocluido y disminuye el número de colisiones como ya se explico en la Pág. 13. Además la ausencia parcial de la oposición que ejerce la fuerza de gravedad sobre la membrana celular, aumenta la velocidad de deshidratación (Contreras et al, 1998; Lobo, 1997).

En el proceso de deshidratación osmótica el corte de la fruta es una variable importante, dado el acomodo de las células dispuestas a la deshidratación. Los alimentos pueden presentar tejidos fibrosos (piña, naranja), arenosos (manzana, pera), esponjosos (sandía), hilosos (mango, mamey) cada uno de ellos presenta diferentes velocidades de deshidratación en función a su estructura, esto es, al realizar un corte longitudinal al tejido, el agua contenida en su interior podrá salir mas fácilmente, por el contrario, si se realiza un corte transversal, el agua encuentra



un mayor número de barreras a vencer (depende el tipo de fruta en estudio), las cuales corresponden a la membrana de cada una de las células.

Por otro lado, en sistemas muy compactos, la transferencia de masa sucede de célula a célula (TTS) lo que no es adecuado para el proceso. En sistemas menos compactos la transferencia de masa es desde la célula hacia un espacio extracelular (TTP) (ver Figuras 4 y 5).

Para fines productivos, el espesor del producto es una variable que influye directamente en los tiempos de proceso. La distancia que recorre el soluto es menor en espesores reducidos.

Cuando el proceso de la deshidratación osmótica se lleva a cabo en un sistema agitado se producen importantes beneficios para la eliminación del agua contenida en la fruta, puesto que, a medida que pasa el tiempo, la interfase fruta-jarabe se compone mayoritariamente por agua expulsada de la fruta, dicha agua se difundiría lentamente en el jarabe concentrado en un sistema sin agitación. En los primeros instantes, la fruta al estar rodeada por su propia agua disminuye la diferencia de concentración en la membrana celular.

Si el sistema es agitado, el agua retirada se aleja de los alrededores de la membrana y se reemplaza por jarabe concentrado, lo que permite que continuamente exista una alta diferencia de concentraciones en el sistema. La agitación reduce la capa límite entre la superficie y la solución, lo que asegura que la transferencia de masa aumente en sistemas agitados (Bird, 1995).

### **1.3.2. Ventajas y desventajas del proceso osmótico.**

Algunas de las ventajas que presenta el proceso osmótico para la deshidratación y procesamiento de alimentos se enumeran a continuación:

- La deshidratación osmótica generalmente se utiliza como un preproceso<sup>4</sup> en los alimentos. Este preproceso permite que la humedad se reduzca en un 50 - 60% y a su vez, que aumente notablemente la ganancia de sólidos solubles. De este modo se obtienen productos de buena calidad organoléptica.
- La ausencia de oxígeno en el interior de la masa del jarabe en el que se sumerge la fruta, evita reacciones de oxidación y pardeamiento enzimático que afectan directamente la apariencia del producto final.
- Las frutas tratadas por este método conservan una alta calidad en sus características nutricionales.
- El agua, al ser eliminada en estado líquido, permite conservar los compuestos aromáticos casi en su totalidad, situación que le confiere una mejor calidad a los productos finales. Esto no es posible cuando en la operación de secado se utiliza aire para la eliminación del agua en el alimento, ya que ésta tiene que experimentar un cambio de fase.
- Así como las características nutricionales, las frutas también conservan en buena medida sus características organolépticas, además si hay un amplio gradiente de concentración y la deshidratación se lleva por suficiente tiempo, los productos son estables a temperatura ambiente ( $\pm 18$  °C).
- Este mecanismo de reducción de humedad permite reducir los tiempos de proceso, esto se traduce de forma directa en un ahorro energético. Este tratamiento puede mejorar las características sensoriales del producto final.
- Los productos tratados por este medio presentan una disminución en el costo de almacenaje ya que se puede prescindir de equipos de refrigeración y no se necesitan empaques especiales. Más aún, no necesitan transportes y/o recipientes especiales para su manejo debido a que son alimentos con actividades de agua bajas. La utilización de este proceso de deshidratación resulta en productos que no requieren de tratamientos químicos pues son estables a lo largo del almacenamiento aún por varios meses.

---

<sup>4</sup> Entiéndase como preproceso a toda aquella operación unitaria que antecede a un secado convectivo, secado solar, congelación, liofilización, deshidratación o secado a vacío, etc.

- La relativa baja actividad de agua del jarabe concentrado, evita el desarrollo de microorganismos que atacan a las frutas en condiciones ambientales (Spiazzi et al.2001).

No obstante las ventajas señaladas, el proceso de la deshidratación osmótica también presenta ciertas desventajas en su aplicación:

- No es recomendable para todas las frutas, actualmente sólo se puede aplicar a frutas de estructura "sólida" que pueden cortarse en trozos.
- Una desventaja importante en el proceso osmótico es la etapa de inmersión de la fruta en el jarabe, ya que aquí se produce flotación, esto debido a la menor densidad de la fruta que además presenta 5 ó 6 veces menos concentración de azúcares que el jarabe y también debido a que la fruta tiene gases ocluidos en su interior, por esto, cuando se intenta sumergir la masa de fruta dentro del jarabe, se forma un bloque compacto de trozos que impiden la libre circulación del jarabe, lo que resulta en la ósmosis parcial del fruto.
- Si la concentración del jarabe no es suficientemente alta para generar un gradiente de concentración amplio y/o el tiempo de deshidratación no es suficiente para lograr una  $A_w$  baja ( $< 0.70$ ), los productos no llegan a ser estables lo que implica que sea necesario un proceso posterior a corto plazo con lo cual inevitablemente se encarece el producto final.
- Otro inconveniente es el manejo de los jarabes para reutilización. El almacenamiento de grandes volúmenes de jarabe puede resultar costoso y peligroso debido a la contaminación que este jarabe puede sufrir cuando la concentración es menor de 60 °Bx. En estas condiciones, el jarabe se considera vulnerable al ataque de microorganismos; cuando esto pasa el jarabe se considera pérdida total pues la fermentación microbiana llega a producir altas concentraciones de alcohol, ésteres y ácidos de sabor y olor desagradables.

- La aplicación del proceso a nivel industrial precisa la reutilización del(os) jarabe(s) lo que suma un costo adicional debido al equipo requerido para la concentración de dichos jarabes.
- Casi todas las frutas utilizadas en este proceso sufren desprendimiento de partículas lo cual genera enturbiamiento de los jarabes.
- En caso de que algún jarabe tenga un bajo nivel de contaminación no detectada a tiempo se puede provocar una contaminación del lote de fruta sumergida en él.
- Finalmente, resulta inminente la presencia de insectos que se generan en los lugares donde se manejan estos jarabes debido a la atracción que estos tienen por los aromas frutales, estos en particular puede ser un problema difícil de erradicar

#### **1.4. TEXTURA EN ALIMENTOS PROCESADOS**

El término 'textura del alimento' se refiere a una experiencia humana surgida de la interacción con el alimento. La textura es un parámetro subjetivo puesto que algunas texturas que pueden ser desagradables para una persona son aceptables e incluso buenas para otras. La percepción de la textura, por tanto, supone la interacción del alimento con los dientes, membrana mucosa y saliva. La boca está adaptada perfectamente para el control y la trituración de una amplia variedad de alimentos y es responsable de la palatabilidad de éstos (en referencia a la textura) aún cuando esta comienza antes de llevarlo a la boca, es decir, se inicia con la vista.

La textura de los alimentos depende fundamentalmente de su estructura, esto es, las frutas y hortalizas son organismos vivos compuestos de células cuyas paredes imparten un grado de rigidez al fruto y mantienen la forma del tejido, todo esto es debido al agua que actúa como plastificante en los tejidos vegetales. Muchos de los cambios de la estructura de la planta están en función del contenido de agua, en algunos alimentos la rigidez o la plasticidad aumenta en contenidos menores a 20% en base seca (como en las zanahorias) debido a la desaparición de agua libre. La

estructura de estos alimentos es uno de los contribuyentes principales de las características de textura final en los alimentos procesados.

Según Christiansen (1984) el modelo de rotura de un alimento así como el tamaño forma y composición de las partículas producidas por la masticación son responsables de la textura del alimento percibida en la boca.

En las frutas y hortalizas la textura se mide con dos objetivos, el primero es para determinar la madurez del fruto con base en la fecha ideal de cultivo, y el segundo, para determinar las características del producto procesado.

Las propiedades texturales de los alimentos como materia prima son un factor importante para su procesamiento. De tales propiedades depende la aceptación de los productos, puesto que conforman los factores sensoriales de aceptación al ser directamente percibidas por los sentidos (Bourne, 1982).

En este sentido, los cuatro factores principales de calidad en un alimento -ya sea fresco o procesado- y de los cuales depende la satisfacción de los consumidores, son:

- Apariencia: Color, tamaño, forma, etc. (basado en las propiedades ópticas).
- Flavor: Comprende sabor (en la lengua) y olor (en la nariz) que son los responsables de los estímulos químicos en la cavidad oral.
- Textura: Responsable de la sensación táctil o sensaciones físicas resultantes del contacto entre algunas partes del cuerpo y el alimento.
- Aporte nutritivo: este a pesar de no ser un factor percibido de manera sensorial es importante en la calidad del alimento (Adrian, 1990; Anzualda, 1994).

Estos factores de aceptación son tan importantes para la identificación y percepción de los alimentos que sin ellos probablemente no podrían ser identificados. Con esta tendencia, Shiffman (1973) realizó experimentos licuando 29 alimentos diferentes ofreciéndolos a la gente con los ojos y nariz tapados, el 41% de los individuos identificaron correctamente los alimentos guiándose únicamente por el flavor, el 59%

restante requirió realizar la prueba con los ojos y/o la nariz destapada para lograr la identificación del alimento (Bourne, 1982; Anzualda 1994).

Los cuatro factores antes mencionados se ven afectados por el procesamiento de alimentos al sufrir deterioro, acentuación o mejora. La modificación de las propiedades de textura, por tanto, está orientada a debilitar la estructura de los alimentos confiriéndoles mayor facilidad de deglución (Bourne, 1982; Rosenthal, 2001).

Los métodos actuales para medir textura se enfocan en la medición de las propiedades mecánicas, esto principalmente contra el hecho de que las percepciones humanas de la textura están enfocadas en nuestro propio aparato mecánico para percepción de textura, estas percepciones además de propiedades mecánicas identifican propiedades químicas y fisicoquímicas, entre otras.

Por tal razón se ha abierto el camino a la reología para abarcar el estudio de la deformación y flujo de materia. Este estudio reológico, se aplica comúnmente en frutos y hortalizas para comprender mejor la relación entre estructura, textura y cambios por proceso (Rosenthal, 2001).

En este sentido, para conocer la textura de los alimentos se ha utilizado el ensayo destructivo realizado mediante el penetrómetro, que, como su nombre lo indica, permite conocer el índice de penetración de los alimentos. En el caso de las frutas y hortalizas, este método permite determinar su estado de madurez al permitir conocer el grado de ablandamiento de los tejidos. Este ablandamiento es debido a cambios de los compuestos pécticos (responsables del ablandamiento del mesocarpio), así como a la degradación de las paredes celulares y un descenso en el contenido en ácidos orgánicos. Estos cambios van acompañados de un rápido decremento en la protopectina y un incremento en la pectina soluble en agua (Wills et al, 1989; Rosenthal, 2001).

Recientemente se han empleado otro tipo de ensayos para medir las propiedades de textura en los alimentos siguiendo la misma tendencia que en las propiedades

mecánicas. Dichas pruebas se pueden clasificar en dos: las de tipo destructivo y las de tipo no destructivo. Las destructivas comprenden pruebas de cizalla, extrusión y el análisis de perfil de textura (TPA). Las pruebas de carácter no destructivo incluyen pruebas de compresión, tensión, flexión, la relación de Poisson y la compresión viscoelástica.

El ensayo de compresión es el más recurrido para la medición de las propiedades de deformación de muchos alimentos. En esta prueba se mide la fuerza en función de la velocidad de deformación. La deformación se calcula por el cambio relativo de la altura y el esfuerzo de la fuerza dividida por el área ajustada.

$$\varepsilon = \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \ln \frac{h}{h_0} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{Fh}{L_0^2 h_0} \quad (9)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Deformación

$dh/h$  = Cambio relativo en la altura

$\sigma$  = Esfuerzo

F = Fuerza

$L_0^2 h_0$  = Área ajustada

La **fuerza** es el esfuerzo máximo que un objeto soporta antes de que se rompa y se puede expresar de acuerdo con la ecuación 10 como se muestra a continuación.

$$F = \frac{F_M}{A_T} \quad (10)$$

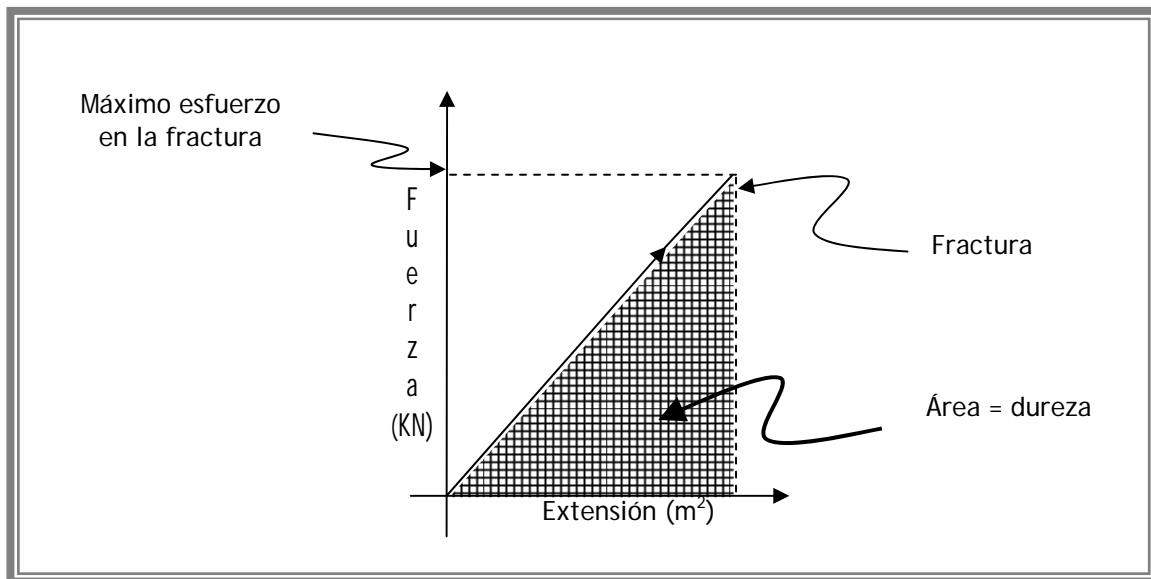
Donde:

F = Fuerza

$F_M$  = Fuerza máxima

$A_T$  = Área transversal

En términos de relación fuerza-extensión, el término fuerza se aplica a la carga máxima entre el área de la sección transversal. En la Figura 7 se muestra la representación gráfica nominal de la curva fuerza-extensión, donde se observa el punto de fractura en el cual después de haber logrado un desplazamiento por medio de la aplicación de una fuerza se obtiene la fractura del material. La dureza corresponde al área bajo la curva (Rosenthal, 2001).



*Figura 7: Representación gráfica de la definición de fuerza y dureza (Rosenthal, 2001).*

#### **1.4.1. Efectos del proceso sobre la pared celular**

En procesos donde se ve involucrado el calor sobre el alimento se producen daños los cuales pueden ser graves cuando llegan a la célula. Dentro de estos tratamientos se tienen los correspondientes al calor seco, estos comprenden a todos aquellos donde no hay aplicación de humedad por un agente externo, a la acción del calor por contacto no directo sobre el alimento, (agua, vapor o algún líquido fisiológico como el jugo).

Los métodos de procesamiento que destruyen la célula destruyen el plasmalema, arruinando la capacidad celular para mantener su turgencia. El procesamiento de



alimentos con calor provoca la gelatinización del almidón así como algunos cambios en la pared celular, principalmente en la lamela central.

El calor húmedo, se aplica mediante un agente externo directamente sobre el alimento, este agente puede ser agua, vapor o cualquier elemento que pueda proporcionar un aumento en la humedad inicial del alimento.

Con el aumento de temperatura de 20 a 60°C, las paredes celulares sufren un espesamiento, citando la ruptura de la lamela central y la pérdida de estructura celular [esta pérdida de estructura es muy evidente más o menos a 60°C (Grote & Frome, 1984)]. También se induce la ruptura de la celulosa y la hemicelulosa (polisacáridos que proporcionan estructura a los alimentos) con el calentamiento prolongado (Mitchell, 1988)

La ruptura de la lamela central se debe al rompimiento de puentes de hidrógeno de las pectinas y otros polisacáridos de la pared celular, este rompimiento de los puentes de hidrogeno favorece el aumento en la solubilidad de la pectina y otros polisacáridos. Un aumento de la solubilidad de la pectina conduce a cierta facilidad en el deslizamiento de la célula lo que trae como resultado un aumento de la elasticidad de los tejidos (Batisse, Buret, Coulomb & Coulomb, 1996; Sterling, 1996).

La penetración de sólidos dependiendo del diferente proceso de transferencia de masa puede ser la causa principal de daño en el alimento.

Las soluciones o jarabes, al ingresar al tejido (generalmente de concentración menor) buscan el equilibrio, esto trae como resultado el ingreso violento de estos sólidos al interior de la célula, si la célula conjuntamente se somete a un tratamiento térmico leve, obtendrá una elasticidad reducida lo que dará como resultado la aceptación de las partículas sólidas de menor tamaño.

La búsqueda de equilibrio de concentraciones, impulsada por la presión osmótica que ejerce el jarabe sobre el alimento puede forzar la entrada de soluto de un tamaño mayor que el aceptado por la célula lo cual desgarrar la membrana celular dejando

que el contenido celular salga a la solución. Esto origina dos efectos. El enriquecimiento del jarabe con el flavor de la fruta y el deterioro del alimento por daño celular.

## 1.5. MICROSCOPIA

El método de análisis de la estructura celular más directo y objetivo que existe, es la observación de los tejidos a nivel celular mediante la utilización de uno o varios lentes que proporcionen el aumento necesario para hacerlos visibles. Este tipo de análisis se ha logrado a través de la microscopia.

La microscopia es la rama de la biología que se encarga del análisis de objetos pequeños con la ayuda del microscopio. El microscopio fue concebido para la observación de cuerpos extremadamente pequeños, estos objetos poco visibles y en la mayoría de los casos invisibles a simple vista para el ojo humano.

La microscopia tuvo sus orígenes en el siglo XVII gracias a la contribución de varios científicos, pero no fue hasta el siglo XIX con los trabajos de Leyden sobre la célula (1848), Pasteur sobre las bacterias (1857), Gerlach sobre tinte selectivo (1858) y Abbe sobre óptica donde empiezan los grandes avances sobre esta rama de la ciencia.

En un periodo extremadamente corto comparado con el desarrollo del microscopio óptico el microscopio electrónico se ha ocupado para obtener una resolución muy cercana al límite actualmente explicado teóricamente por Abbe. Esta resolución límite se sitúa alrededor de la mitad de la longitud de onda, la luz empleada sitúa esta longitud alrededor de  $200 \text{ \AA}^5$  (ángstroms), lo que significa que el ojo humano no recibe ninguna información suplementaria al respecto de la observación.

Entre las similitudes y diferencias entre el microscopio óptico y el electrónico es importante mencionar que el primero permite ver la textura de los objetos hasta un tamaño mínimo de aproximadamente de  $1/350$  del límite de resolución del ojo,

---

<sup>5</sup> Angstrom. Medida de longitud la cual equivale a  $\text{Å} = 1 \times 10^{-10} \text{m}$

mientras que el microscopio electrónico es capaz de mejorar el aumento útil de los microscopios ópticos en un factor que es de hasta 1/5000 respecto al ojo.

El diseño de construcción de ambos microscopios es casi idéntico. En la Figura 8 se muestra el esquema del microscopio óptico (MO) y el microscopio electrónico de barrido (MEB) en donde se observa la diferencia entre los mismos, la cual radica en la fuente de iluminación. Para el microscopio óptico, dicha fuente de iluminación es un haz de luz, mientras que para el microscopio electrónico es un haz de electrones (Vázquez, 2000).

En el microscopio óptico (MO) la iluminación se condensa en la muestra, la imagen iluminada pasa a través de los lentes (objetivo, condensador y proyector) logrando así tener una recepción directa para el ojo humano.

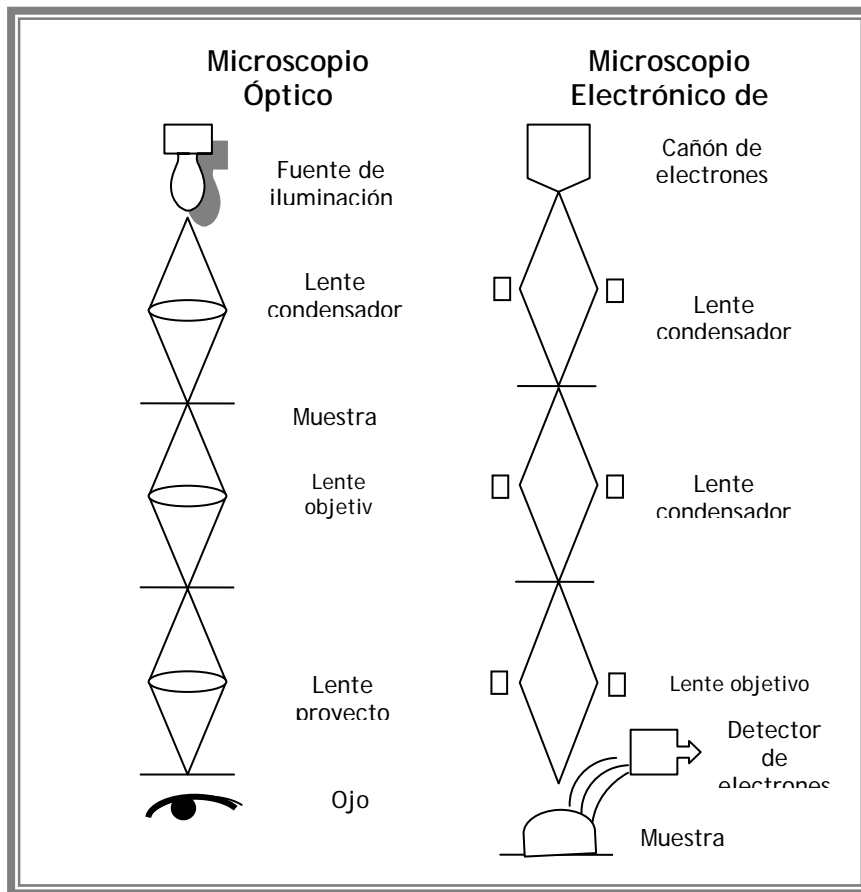


Figura 8. Esquema del diseño de construcción de microscopios (González, 2003).

En el microscopio electrónico de barrido (MEB) la muestra es bombardeada por una ráfaga de electrones la cual previamente pasa por los lentes condensadores y objetivo. Al impactar la muestra se genera una refracción de electrones que son captados en un detector de electrones secundarios formando una imagen lógica, la cual se proyecta en un medio externo para el espectador (Vázquez, 2000).

El microscopio electrónico ha sido también empleado en estudios de deshidratación osmótica de frutas. En estos estudios se ha demostrado que muchos de los aspectos de la estructura celular se ven afectados durante el proceso de D.O. como son la alteración de la pared celular, la descomposición del centro de la lamela, la muerte de la membrana, el encogimiento de tejidos, etc. Estos cambios tisulares, alteran fuertemente la estructura celular, la matriz de la pared celular y la permeabilidad de la membrana, por lo que pueden influir enormemente en las propiedades de transporte durante el proceso (Nieto A. B.).

## **1.6. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y METODO TAGUCHI.**

En el aseguramiento de la calidad existen algunos métodos estadísticos que son útiles en el análisis de problemas de la calidad y para mejorar el rendimiento de los procesos de producción.

El diseño de experimentos (DE) es extremadamente útil para descubrir las variables que influyen en las características de calidad de interés en el proceso. Por lo que un experimento diseñado, es un proceso en el que se varían sistemáticamente los factores controlables de entrada y se estudia el efecto que tienen dichos factores en los parámetros de salida de los productos. En otras palabras el cometido de esta herramienta del DE es la de analizar los factores controlables de proceso tales como: (temperatura, presión, velocidad) y factores no controlables como: (calidad de la materia prima por parte del proveedor, factores ambientales, etc.) los cuales están presentes en un proceso de fabricación que transforma estas entradas en un producto terminado que tiene varios parámetros los cuales describen su calidad o su aptitud para el uso (Montgomery, 1991).

Por su parte el objetivo del método de Taguchi es lograr productos y procesos robustos<sup>6</sup> frente a las causas de factores de ruido que hacen que las características funcionales de los productos se desvíen de sus valores óptimos provocando costos de calidad.

La propuesta de Taguchi es un conjunto de métodos y procedimientos que se ha dado en llamar “Diseño Robusto de Parámetros” (Taguchi y Wu, 1980), de tal manera que son relativamente insensibles a factores difíciles de controlar, obteniendo así la calidad requerida a pesar de ello, cuyas principales propiedades son:

- Insensible a las condiciones del medio.
- Insensible a los factores que dificultan el control.
- Proporciona variación mínima en su funcionamiento.

Un componente clave de la filosofía de Taguchi es la de reducir la variabilidad de cada característica de funcionamiento dentro de un proceso alrededor de su valor nominal. En resumen la filosofía de Taguchi puede resumirse en tres ideas fundamentales (Saderra, 1993; Montgomery, 1991).

- Los productos y procesos deben diseñarse de modo que sean robustos ante las fuentes de variabilidad externa.
- Los métodos de diseño experimental son instrumentos técnicos para auxiliar en el logro de este objetivo.
- La operación según lo especificado es más importante que el apego a las especificaciones.

Como ya se mencionó anteriormente la metodología de Taguchi se basa en el diseño de parámetros robustos, el cual involucra diseños factoriales fraccionados que consiste en factores que se pueden controlar durante el proceso (parámetros) y de los que no son controlables (ruido). Uno de los objetivos de dicha metodología es la de ver que combinación de factores controlables es la menos sensible a los cambios en las variables de ruido. Así en un experimento en donde la desviación estándar es

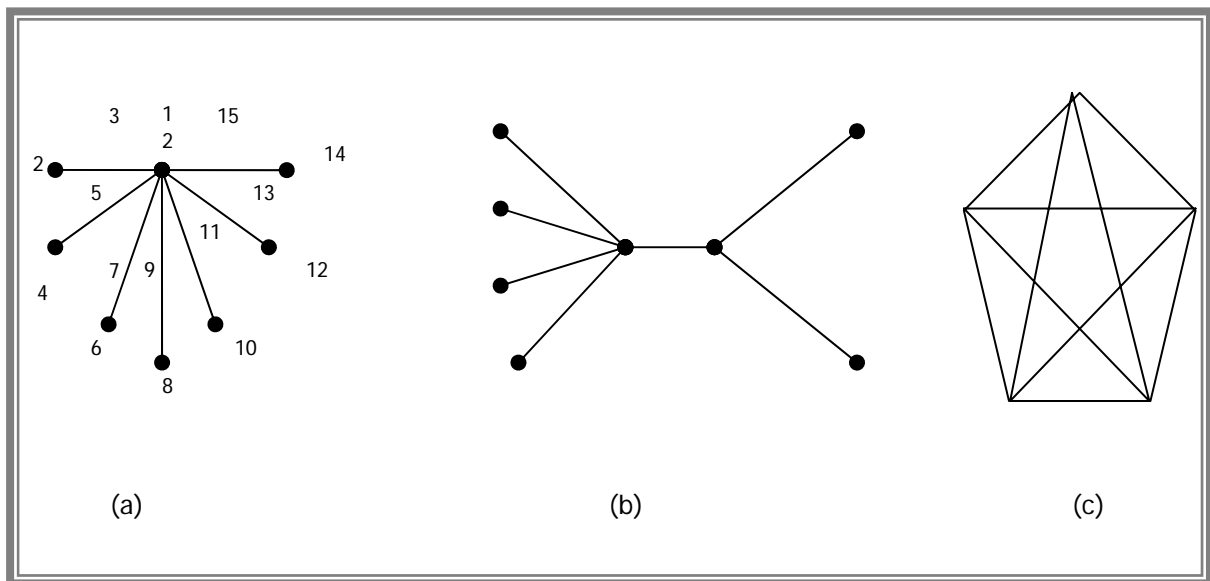
---

<sup>6</sup> La resistencia de los procesos o productos a la variación.

menos sensible a los cambios en los niveles de ruido del factor, se considera el más robusto, ya que las fluctuaciones en el factor ruido transmiten una variabilidad menor a la respuesta del producto (Taguchi methods).

Taguchi ha implementado diseños factoriales ya establecidos, para estudiar las interacciones de los factores y que van desde interacciones sencillas hasta más complejas, para ver cual es la combinación mas adecuada. Además hace uso de graficas lineales y esta ha sido una de las contribuciones más importantes del método Taguchi ya que le aporta facilidad a un análisis rápido y confiable de datos.

En la Figura 9 se muestran algunos de los gráficos utilizados por la metodología de G. Taguchi. Cada extremo o vértice de recta significa un factor determinado y el segmento de la recta significa la interacción entre dos o mas factores.



*Figura 9. Ejemplos de los diseños factoriales simplificados propuestos por Taguchi para el diseño de experimentos. (Barker, 1990).*

Algunos de los diseños establecidos por Taguchi se puede ver que son más complicados que otros, como por ejemplo: el ejemplo 9-a se tienen 8 variables (factores) y 7 interacciones. Para el caso 9-c donde un cada vértice del pentágono que representa un factor, tiene interacción hasta con cuatro factores. En el siguiente capítulo se plantea la metodología empleada para realizar esta investigación.

## CAPITULO 2: METODOLOGÍA

---

### 2.1 OBJETIVOS

#### **Objetivo general:**

Determinar experimentalmente la influencia de las principales variables que afectan la velocidad de la deshidratación osmótica y los cambios estructurales del producto a través de la medición de las características de textura (resistencia mecánica), los cambios en el encogimiento (microscopía) y la elaboración de curvas de secado, durante la elaboración de una golosina de piña o manzana analizando los resultados por medio del método de Taguchi, para obtener parámetros de diseño en el proceso así como la comparación del producto con uno deshidratado mediante secado convectivo.

#### **Objetivo particular 1**

Determinar experimentalmente el porcentaje de influencia que tienen las variables (tipo de solución osmótica, concentración de la solución osmótica, temperatura, presión, agitación, fruto, corte y espesor) en la cinética de deshidratación osmótica, utilizando un diseño experimental ortogonal Taguchi, así como para conocer la interacción entre ellas

#### **Objetivo particular 2:**

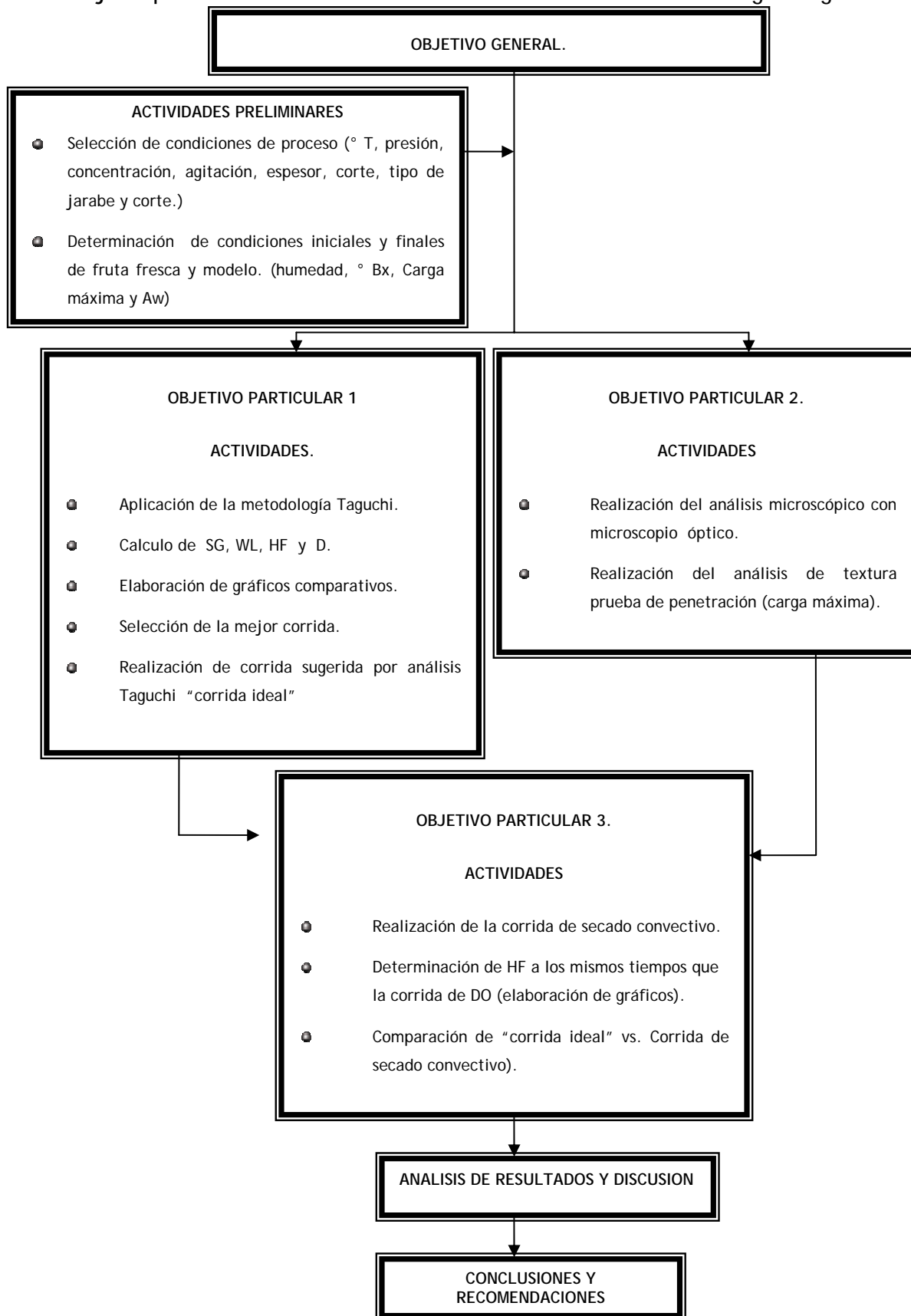
Determinar experimentalmente los cambios estructurales que sufre el producto durante el proceso con un análisis de textura (prueba de penetración) y un análisis óptico para conocer el efecto de las variables sobre el producto.

#### **Objetivo particular 3:**

Comparar experimentalmente los procesos de deshidratación osmótica empleando los niveles recomendados de la mejor corrida según el análisis estadístico y una corrida procesada mediante secado convectivo, evaluando las propiedades texturales de dureza (carga máxima) y daño estructural (análisis óptico) para la obtención de un producto final de mejor calidad.

## 2.2 CUADRO METODOLÓGICO

El trabajo experimental se realizó mediante la secuencia metodológica siguiente:





## 2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.3.1 Actividad de agua (Aw)

La determinación de la actividad de agua de la fruta y del jarabe fue realizada en un higrómetro de punto de rocío (AQUALAB) Decagon, mod. CX2. El método esta basado en la relación de la presión vapor de agua dentro del alimento con respecto a la presión de vapor del agua pura a presión y temperatura constante.

*Procedimiento.*

1. Se realizó la toma de muestra de 1g de fruta y de 5ml de jarabe.
2. Se colocaron en el equipo y se obtuvieron lecturas directas de Aw.

### 2.3.2 Contenido de sólidos solubles (AOAC 22.024)

La determinación de sólidos solubles se realizó por medio del método del refractómetro de la marca (ABBE) mod.

*Procedimiento.*

1. Se realizó la toma de muestras de fruta y jarabe a los tiempos de análisis.
2. El jarabe se ensayó a 25° C directamente en el refractómetro. La fruta se colocó en un mortero y se trituró finamente, se buscó extraer el jugo de los tejidos, el cual se colocó en el prisma del equipo para su lectura.
3. Los resultados de la evaluación se calcularon de la siguiente manera:

$$\%Ss = \%S_{ref} \frac{(100 - W)}{100} \quad (11)$$

Donde:

% Ss = % de sólidos solubles.

% S<sub>ref</sub> = Lectura de % de sólidos en el refractómetro.

W = % de humedad de la muestra.

### 2.3.3 Contenido de humedad (AOAC 934.6)

Para la determinación del contenido de humedad se utilizó el método por estufa utilizándose una de la marca (Riossa). El método esta basado en la diferencia de pesos que existe entre el material al inicio de la prueba y el peso del mismo material al final de la prueba.

La preparación de la muestra fue de la siguiente manera:

FRESCA: Se obtuvieron cubos de pulpa de fruta pelada.

PROCESADA: De las muestras inmersas sumergidas en la solución osmótica en el momento de la toma de lecturas, se cortó 1 g de fruta, se secó con un papel absorbente el exceso de jarabe del exterior y se registró peso inicial.

#### *Procedimiento:*

1. Se realizó la toma de 1 g de muestra al tiempo dado.
2. Se realizó la Lectura del peso inicial de la muestra en una balanza analítica (Scientech, mod. ESL 2500).
3. Se colocó en un crisol llevado a peso constante.
4. Se colocó por un espacio de 3 h en la estufa.
5. Se pesó el crisol con muestra (hasta obtener peso constante).
6. El resultado se calculó mediante la formula siguiente:

$$[H_2O] = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \quad (12)$$

Donde:

$[H_2O]$  = Contenido de humedad. (g<sub>H2O</sub>/g<sub>tot</sub>)

$W_i$  = Peso inicial del alimento. (g<sub>H2O</sub>/g<sub>tot</sub>)

$W_f$  = Peso final del alimento. (g<sub>H2O</sub>/g<sub>tot</sub>)

#### **2.3.4 Densidad por Gravimetría.**

El método esta basado en la diferencia de pesos que existe entre el picnómetro con muestra (jarabe) y el peso del mismo sin muestra.

*Procedimiento:*

1. Se llevaron a peso constante los picnómetro
2. Una vez alcanzado el peso constante de los picnómetros se colocaron dentro del desecador.
3. Se vertieron 5 ml de jarabe y se tomó la lectura de la balanza analítica (Scientech, mod. ESL 2500)
4. Se calculó la diferencia de pesos( inicial - final) obteniéndose el valor en g/ml

#### **2.3.5 Microscopio óptico.**

El análisis óptico se realizó en un microscopio óptico compuesto de la marca (Olympus, mod. CX31). Se tomaron tres muestras representativas de cada una de las corridas del objetivo particular 1, a diferentes tiempos de proceso (1, 3 y 5 hrs. de proceso) utilizándose 2 colorantes; azul de bromocresol y verde de malaquita.

*Procedimiento*

1. Obtención de la muestra homogénea.
2. Se realizó el corte de las muestras representativas.
3. Se llevo a cabo la coloración de la muestra.
4. Se realizó la observación de la muestra.

#### **2.3.6 Microscopio Electronico de Barrido (MEB)**

Debido al alto costo en el uso del MEB, solo se tomó una fotografía por proceso. Es decir: DO (corrida ideal), secado convectivo, deshidratado comercial y cristalizado.

En la preparación de muestras para el Microscopio Electrónico de Barrido (Joel, mod. JSM 25sII) se tuvo especial cuidado, debido a que la fuente de iluminación en este microscopio es un haz de electrones en un sistema al vacío, en este caso existen ciertas limitaciones, por lo que las muestras no podían ser observadas en vivo por su contenido de agua. Por otro lado esta muestra debía ser emisora de electrones secundarios, para lograr esto fue necesario realizar los siguientes pasos.

1. Corte de la muestra:  $1\text{cm}^3$ .
2. Fijación: Este paso se realizó inmediatamente después del corte de la muestra, con el objetivo de conservar sus propiedades sin que sufriera mayor deterioro, esto se llevó a cabo con glutaraldehído, tetróxido de osmio ó una combinación de los dos para obtener un mayor contraste en el momento de la observación.
3. Lavado: Una vez fijada la muestra se realizó un lavado con solución tampón de fosfatos para eliminar el exceso del fijador.
4. Deshidratación: Posteriormente se llevó a cabo una deshidratación gradual con alcohol etílico al 40 - 100 % en forma ascendente.
5. Secado a punto crítico: En este paso lo que se buscó fue sustituir por completo el contenido de agua y alcohol que quedaba en la muestra. Esta operación se realizó en un secador de punto crítico. Este proceso se realizó a temperatura y presión crítica<sup>1</sup>, de esta forma el agua pudo ser extraída fácilmente, por otro lado se utilizó  $\text{CO}_2$ , sustancia miscible 100% con el alcohol de modo que al ponerlas en contacto éste retirará el exceso de disolvente.
6. Baño de oro: Para poder observar la muestra en el MEB esta debió contar con una capa secundaria emisora de electrones de baja energía, por lo que las muestras fueron cubiertas con una capa fina de oro.

---

<sup>1</sup> Temperatura y presión donde desaparece la interfase líquido-gas

7. Interpretación: Los electrones emitidos por esta fuente metálica posteriormente se colectaron y convirtieron electrónicamente en el sistema detector, para ser proyectados por una cámara en un monitor tipo televisión (González, 2003).

### **2.3.7 Análisis por penetración**

Para la determinación de las propiedades texturales se utilizó la Máquina Universal de textura (Instron, mod 1125), en ésta se corrió el programa de penetración, la fuerza máxima requerida, que es el esfuerzo que un objeto soporta antes de que se rompa. Se utilizó un instrumento de penetración recto en forma de varilla de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro.

La determinación se realizó a las mismas muestras que se ocuparon en el análisis microscópico y a la muestra de la corrida recomendada por el análisis estadístico de Taguchi.

#### *Procedimiento.*

1. De las diferentes muestras de producto se seleccionaron barras completas de 1 x 1 x 8 cm ó de 2 x 2 x 16 cm con base a la corrida en estudio.
2. Se secó el exceso de jarabe de cada una de las muestras.
3. Se colocó en el equipo y se corrió el programa antes mencionado.
4. El resultado fue obtenido directamente del programa mediante gráficos de fuerza vs. desplazamiento.

## **2.4 ACTIVIDADES PRELIMINARES**

Para el cumplimiento de los objetivos particulares, se tuvieron que realizar algunas actividades preliminares donde se determinaron parámetros de selección de: materia prima, preparación de la solución osmótica, temperaturas de operación velocidad de agitación, presión de vacío y selección de dulces cristalizados "modelo", a fin de tener un mayor control de las condiciones del proceso, los cuales se describen a continuación.

#### **2.4.1. Selección de fruta.**

Para la selección de los dos tipos de fruta de proceso se consideró: la firmeza, uniformidad de tamaño y forma, así como el que estuviera libre de pudriciones, de quemaduras de sol, agrietamientos, magulladuras y daños por insectos. Para la piña se buscó que las hojas de la corona fueran de color verde, longitud media, y erguidas. Para la manzana se buscó que su color fuera amarillo. A las frutas se les determinaron las siguientes características, según (Materiales y Métodos):

- Humedad Por método de estufa
- Densidad Por desplazamiento
- Grados Brix Por refractometría
- Actividad de agua Por punto de rocío
- Carga máxima Por texturometro Instron

#### **2.4.2. Preparación de la solución osmótica.**

El jarabe de sacarosa se encontró en el mercado, utilizándose el de la marca “La Madrileña” el cual contenía 60 °Bx. El jarabe de glucosa se preparó en el laboratorio utilizándose glucosa en polvo grado reactivo de la marca “Glucosa del País” la cual se disolvió en agua destilada hasta obtener las concentraciones deseadas 30 y 60 °Brix. Una vez obtenidas las concentraciones de los jarabes se procedió a determinarles los siguientes parámetros mediante los métodos ya explicados en la sección de Materiales y Métodos:

- Densidad ( $\rho$ ) Por método gravimétrico.
- Grados Brix (°Bx) Por refractometría.

#### **2.4.3. Selección de temperatura de proceso.**

En esta actividad los dos tipos de jarabe (glucosa y sacarosa) saturados fueron ensayados en una simulación del proceso sin fruta a diferentes temperaturas por encima de la ambiental, para encontrar en estos la temperatura máxima de

operación sin presentar cambios que pudieran interferir en el producto final, tales como aporte de color y sabor por caramelización del jarabe y baja osmosidad por cristalización de los sólidos.

#### **2.4.4. Determinación de velocidad de agitación.**

Para el cumplimiento de esta actividad, la velocidad de agitación se determinó mediante la utilización de un tacómetro electrónico (Col- Palmer modelo 8211) y un agitador magnético al que se le adiciono en un extremo cinta antireflejante y una parilla eléctrica con agitación (Termolyne, tipo 1000) para medir las revoluciones por minuto (RPM). Fijando un valor de 2600 RPM.

#### **2.4.5. Determinación de la presión de vacío.**

Se tomó el dato de la línea de vacío mediante un vacuómetro, la cual proporciona una presión de vacío de 29 cm de Hg, que fue la que se utilizó.

#### **2.4.6. Selección de parámetros de referencia (dulce cristalizado)**

Se seleccionó un dulce cristalizado poseedor de las características finales deseadas (dulce modelo), para la obtención de parámetros de referencia en la aplicación del proceso osmótico a la piña y manzana; se buscaron frutos de consistencia y tipo de tejido similar a las frutas en estudio.

Para el caso de la piña se encontró piña cristalizada y deshidratada de manera comercial; para el caso de la manzana se utilizó calabaza cristalizada y pera deshidratada ya que no se encontró manzana deshidratada en el mercado, por lo que se optó por estos productos que poseen tejido y textura similar a la manzana. Estos dulces fueron sometidos a una evaluación física, de la cual por aspectos visuales y de tacto se seleccionaron dos tipos de dulce para cada fruto en estudio. A estas selecciones se les hicieron pruebas físicas, químicas y fisicoquímicas para la obtención de los valores requeridos, mismas que se le realizaron a la fruta fresca .

## 2.5 PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

De acuerdo a lo que se describió en las actividades preliminares las muestras "modelo" utilizadas fueron las siguientes:

### 2.5.1 Muestras en fresco:

- Piña (Ananas comosus, variedad cayene)
- Manzana (Malus pumila, variedad golden delicius)

De cada uno de los materiales se extrajeron muestras en forma de prisma rectangular de 1x1x8 cm y de 2x2x16 cm, con un peso promedio aproximado de 8 y 55 g, respectivamente, para su utilización inmediata. Se cortaron placas infinitas de piña y manzana en forma longitudinal ó transversal al eje de la fruta, como lo muestra la Figura 10. Para el caso de manzana fue necesario sumergir las muestras cortadas en una solución de ácido ascórbico al 1 % durante 10-15 min, para evitar el oscurecimiento por actividad enzimática, y secarla con papel absorbente, antes de su inmersión en la solución osmótica.

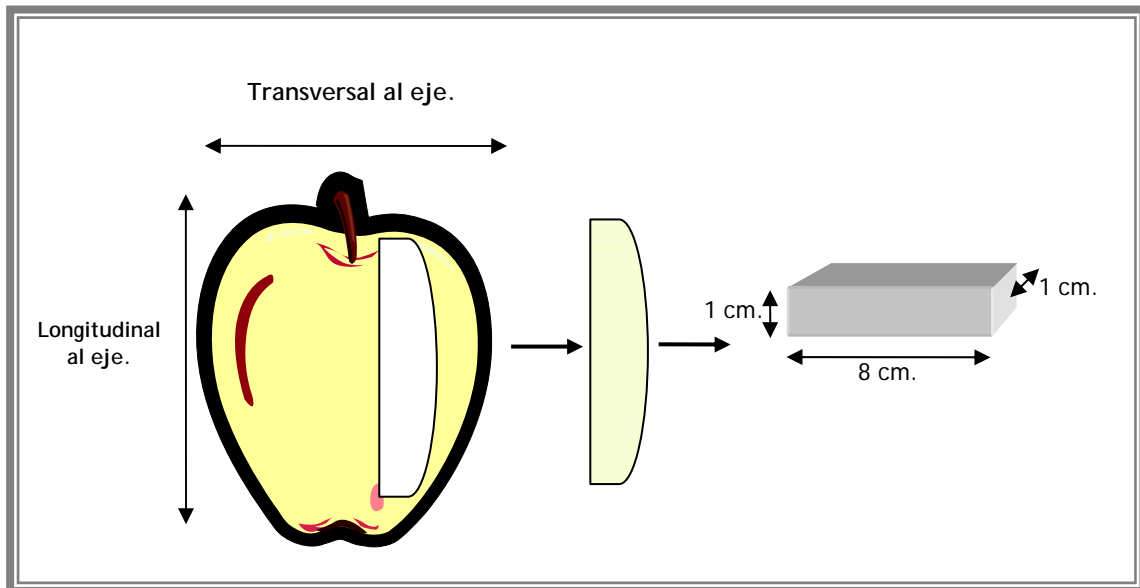


Figura 10: Obtención de muestras en forma de placas



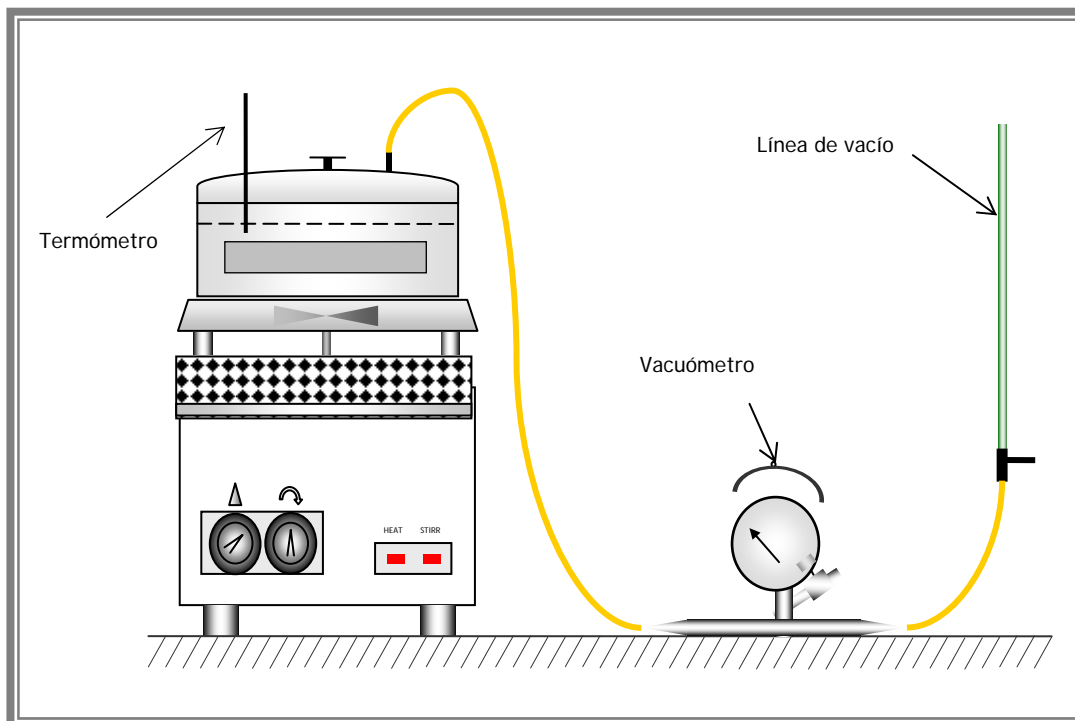
### 2.5.2 Muestras procesadas:

- Piña deshidratada
- Piña cristalizada
- Pera deshidratada
- Calabaza cristalizada

De estos materiales solo se tomaron muestras de 1x1x8 cm para obtener los parámetros de referencia, según se describió en el apartado de actividades preliminares

### 2.5.3. Equipo de Deshidratación Osmótica

Las características del experimento, hicieron necesario el uso de una celda de en la cual se pudieran manipular y controlar las ocho variables en estudio, por lo cual se decidió adaptar un recipiente como se muestra en la Figura 11.



*Figura 11: Celda de experimentación*

## 2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

Después de obtener las muestras a utilizar para cada una de las corridas y los niveles de las variables a considerar, se eligió un diseño ortogonal según la Metodología Taguchi, el cual se presenta en el Cuadro 3.

*Cuadro 3: Diseño ortogonal L16 de Taguchi.*

Corrida	Concentracin (°B)	Temperatura (°C)	Solución osmótica	Presión (cm de Hg)	Tipo de Corte	Espesor (cm)	Fruto	Agitación
1	30	20	Glucosa	29	Longitudinal	1	Piña	Sin
2	30	20	Glucosa	29	Transversal	2	Manzana	Con
3	30	20	Sacarosa	54	Longitudinal	1	Manzana	Con
4	30	20	Sacarosa	54	Transversal	2	Piña	Sin
5	30	50	Glucosa	54	Longitudinal	2	Piña	Con
6	30	50	Glucosa	54	Transversal	1	Manzana	Sin
7	30	50	Sacarosa	29	Longitudinal	2	Manzana	Sin
8	30	50	Sacarosa	29	Transversal	1	Piña	Con
9	60	20	Glucosa	29	Longitudinal	1	Piña	Sin
10	60	20	Glucosa	29	Transversal	2	Manzana	Con
11	60	20	Sacarosa	54	Longitudinal	1	Manzana	Con
12	60	20	Sacarosa	54	Transversal	2	Piña	Sin
13	60	50	Glucosa	54	Longitudinal	2	Piña	Con
14	60	50	Glucosa	54	Transversal	1	Manzana	Sin
15	60	50	Sacarosa	29	Longitudinal	2	Manzana	Sin
16	60	50	Sacarosa	29	Transversal	1	Piña	Con

Una vez obtenidos los datos necesarios, se procedió a la realización del cálculo de parámetros de la cinética de deshidratación osmótica, según Mújica (2003), así como del coeficiente de difusión para el líquido.

Los datos experimentales iniciales se obtuvieron de la muestra en fresco y de las soluciones osmóticas recién preparadas, mediante las técnicas ya mencionadas en la sección de Materiales y Métodos; posteriormente se analizaron cada 15 minutos desde el inicio del proceso, durante las primeras 5 horas, para las diferentes corridas

propuestas en el diseño ortogonal de Taguchi. Posteriormente las lecturas se realizaron a cada hora.

### 2.6.1 Ganancia de sólidos

$$SG = \frac{(WS_t - WS_o)}{(WS_o + WW_o)} \quad (13)$$

Donde:

- SG = Ganancia de sólidos. (g<sub>sol</sub>/g<sub>tot</sub>)
- WS<sub>t</sub> = Peso de los sólidos finales. (g<sub>sol</sub>/g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)
- WW<sub>o</sub>= Peso del agua inicial (g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/g<sub>tot</sub>)
- WS<sub>o</sub>= Peso de los sólidos iniciales. (g<sub>sol</sub>/g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)

### 2.6.2 Pérdida de humedad

$$WL = \left[ \frac{(WW_o) - (W_t - WS_t)}{(WS_o + WW_o)} \right] \quad (14)$$

Donde:

- WL = Perdida de Humedad. (g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/g<sub>tot</sub>)
- WW<sub>o</sub>= Peso del agua inicial (g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/g<sub>tot</sub>)
- W<sub>t</sub> = Peso de la muestra. (g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/g<sub>tot</sub>)
- WS<sub>o</sub>= Peso de los sólidos iniciales. (g<sub>sol</sub>/g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)

### 2.6.3 Coeficiente de difusión.

Los coeficientes de difusión se obtuvieron de la solución analítica a la segunda ley de Fick, para la geometría de placa infinita y en estado inestable (Barbosa, 2000). Para encontrar la humedad de equilibrio, se obtuvo la velocidad de cambio de contenido de humedad (-dH<sub>2</sub>O/dt) en función del contenido promedio de humedad en base seca.

$$\ln \frac{[H_2O_t] - [H_2O_{eq}]}{[H_2O_0] - [H_2O_{eq}]} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{Da * t * \pi^2}{\frac{x^2}{2}} \quad (15)$$

Donde:

$[H_2O_t]$  = Humedad al tiempo (t) ( $g_{H_2O}/g_{tot}$ )

$[H_2O_0]$  = Contenido de humedad inicial (fruta fresca) ( $g_{H_2O}/g_{tot}$ )

$[H_2O_{eq}]$  = Contenido de humedad de equilibrio ( $g_{H_2O}/g_{tot}$ )

$D_a$  = Difusión ( $m^2/s$ )

$T$  = Tiempo (s)

$X^2/2$  = Espesor (m)

La expresión anterior pudo linealizarse de la siguiente manera, para obtener el coeficiente de difusión a partir del valor de la pendiente en un gráfico como el que se muestra en la Figura 12

$$y = \ln \frac{[H_2O_t] - [H_2O_{eq}]}{[H_2O_0] - [H_2O_{eq}]} \quad (15 a)$$

$$mx = \frac{Da * t * \pi^2}{\frac{x^2}{2}} \quad (15-b)$$

$$b = \ln \frac{8}{\pi^2} \quad (15-c)$$

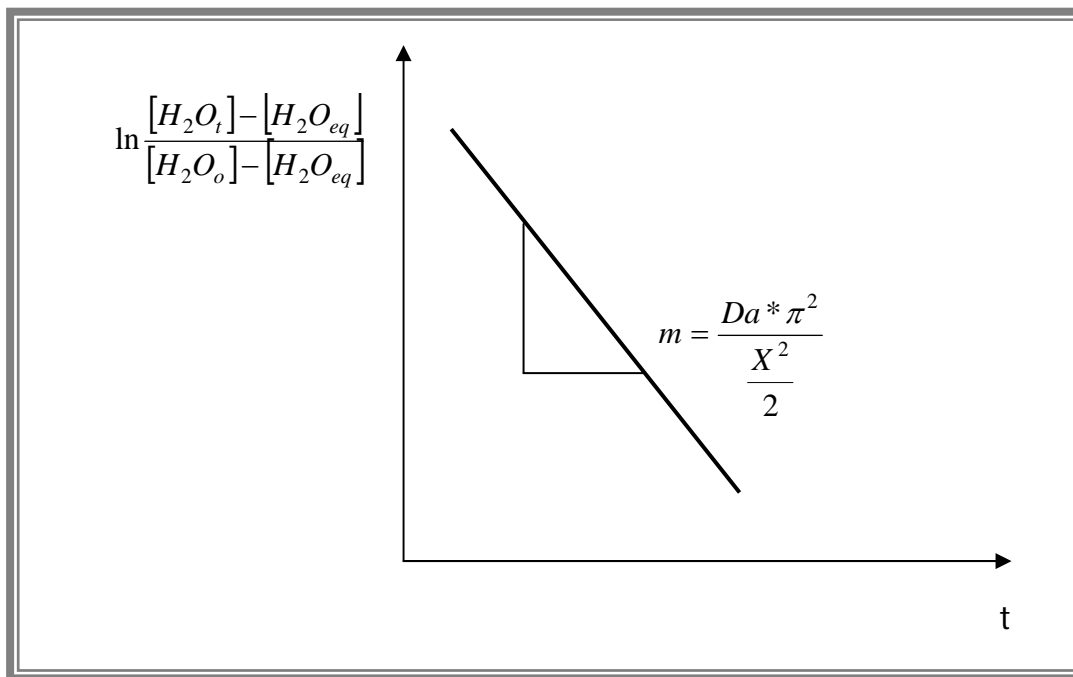


Figura 12- Obtención del coeficiente de difusión (D)

## 2.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS, SELECCIÓN DE LA MEJOR CORRIDA

Con el cálculo de los parámetros de cinética de deshidratación osmótica se llevó a cabo el análisis de resultados mediante la realización de gráficos comparativos y con el programa “ANOVA 2003 Taguchi methods” para la determinación de la influencia de las variables y la selección de la mejor corrida del arreglo ortogonal Taguchi.

Después de obtener la mejor corrida experimental se realizó una corrida con los niveles recomendados por el programa “ANOVA 2003 Taguchi methods” a la que se denominó “corrida ideal”, la cual proporciona una mejora del proceso por encima de la mejor corrida experimental.

## 2.8 ANÁLISIS MICROSCÓPICO Y DE TEXTURA

Durante cualquier tipo de proceso se sufren cambios estructurales, la expectativa predominante es que todos estos cambios sean deseados y favorables a las características propias del producto, en la realidad no todos estos cambios son benéficos para el producto por lo que resulta importante realizar un registro de

cambios internos globales que se presentan en el sistema a lo largo de la experimentación.

El análisis de textura se realizó a las mismas muestras que se analizaron en el microscopio óptico, como se explico en el apartado Materiales y Métodos (pág 42) para observar el daño a nivel celular, tomando como referencia el tejido de la muestra en fresco.

## **2.9 COMPARACIÓN CON EL SECADO CONVECTIVO.**

Como se sabe, existen diversos métodos para la eliminación de agua de los alimentos. Por rápido y económico el secado convectivo es el más utilizado en la deshidratación de productos alimenticios, principalmente frutihortícolas. Se tomó este proceso como base de comparación de los beneficios operativos en la aplicación del proceso de deshidratación osmótica. Para el cumplimiento del tercer objetivo se realizo lo siguiente:

1. Se sometió una muestra en fresco a secado convectivo haciendo mediciones de humedad a intervalos de tiempo iguales que su similar procesada por deshidratación osmótica, hasta alcanzar el contenido de humedad final de 25%.
2. Se realizo el análisis y la elaboración de gráficos comparativos entre los dos procesos "secado convectivo" y DO "corrida ideal" con base al contenido de humedad de las muestras en cada proceso.
3. A las corridas mencionadas anteriormente "secado convectivo" y "corrida ideal" se les efectuó la prueba de penetración.
4. se realizó el análisis óptico en el (MEB) a una muestra representativa de cada proceso y en fresco (muestra en fresco, corrida ideal, secado convectivo, y dulce cristalizado) debido a cuestiones de costo.

## CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1 ACTIVIDADES PRELIMINARES

#### 3.1.1 Fruta fresca.

*Cuadro 4. Valores promedio obtenidos de las frutas frescas.*

Fruta	Humedad (g <sub>h2o</sub> /g <sub>tot</sub> )	Carga máxima requerida (KN)	Actividad de Agua (Aw)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Grados Brix (°Bx)
Piña	0.90	0.3198	0.95	1122	10.71
Manzana	0.86	0.8906	0.89	1160	13.11

El conocimiento de las características iniciales de nuestra materia prima siempre presenta la ventaja de saber cuales son las condiciones más adecuadas para determinado proceso de transformación, conservación y almacenamiento.

Los valores presentados en el cuadro 4, son el promedio obtenido de los 8 valores de las corridas del arreglo ortogonal Taguchi, correspondientes a cada fruta los cuales nos permitieron conocer los parámetros de mayor interés antes del inicio del proceso osmótico. Se observó que la piña que es la fruta con un contenido de humedad mayor que la manzana, presentó una Aw mayor, al mismo tiempo nos dejó ver que mientras mayor cantidad de humedad haya menor densidad tiene el fruto y por lo tanto requieren de una menor fuerza requerida para ser penetrados, ya que los sólidos que son de mayor peso molecular le confiere al fruto un incremento en la fuerza requerida a ser penetrados.

#### 3.1.2 Selección de dulces cristalizados modelo

Como se indicó en el capítulo de Metodología, para fijar los parámetros por alcanzar, se seleccionaron dos tipos de fruta con características estructurales similares a las frutas en estudio, para el caso de la manzana fueron seleccionadas pera deshidratada y calabaza cristalizada. Con referencia a la piña, se consiguió en el mercado esta

fruta en las dos presentaciones (deshidratada y cristalizada), los resultados de las determinaciones realizadas se muestran en el Cuadro 5:

*Cuadro 5. Valores de referencia en productos modelo*

Producto	Humedad (g <sub>h2o</sub> /g <sub>tot</sub> )	Carga máxima requerida. (KN)	Actividad de agua Aw	Densidad del Sólido (Kg/m <sup>3</sup> )	Absorbancia (nm)	pH
Piña deshidratada	0.2932	0.3934	0.791	1590	4.0690	3.75
Piña cristalizada	0.0714	0.9059	0.748	2000	4.0367	5.27
Pera deshidratada	0.2875	0.2427	0.832	1780	4.0165	4.40
Calabaza cristalizada	0.3272	----	0.828	1360	4.0145	6.60

Para el estudio de un producto de baja humedad, el contenido de agua es el parámetro de mayor importancia; con base en los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los dulces comerciales, se observó que los resultados de los demás parámetros dependen de esta humedad, por ello dichos parámetros solo se utilizaron para fines comparativos, ya que tienen importancia en el producto final.

Como se puede observar en el Cuadro 5 para el caso de la calabaza cristalizada no se reportó un valor de carga máxima, debido a que la resistencia que puso el producto a la fractura fue mayor a la carga máxima generada por el equipo (5 KN) de tal manera que el equipo no alcanzó a registrarla.

Debido a la ausencia de datos bibliográficos de contenido de humedad en los dulces cristalizados, se decidió fijar 0.25 g<sub>h2o</sub>/g<sub>tot</sub> como el contenido de humedad final que debía tener la golosina, este valor fue resultado de la aplicación de un promedio de la humedad final de los cuatro productos, (0.26 g<sub>h2o</sub>/g<sub>tot</sub>) entre las frutas suaves (pera y piña deshidratada) y las frutas duras (calabaza y piña cristalizada).

De igual manera se establecieron valores máximo y mínimo de aceptación para la carga máxima requerida para ambas frutas. Resultando como valor mínimo 0.39KN debido a que como la textura de la pera era poco consistente al tacto, se decidió



seleccionar el valor mínimo de la piña deshidratada. Como valor máximo 0.90 kN y el valor ideal a alcanzar 0.600 kN. Ya que el promedio de las cuatro muestras modelo fue de 0.514 kN.

Estos dos parámetros (contenido de humedad y textura) fueron los considerados para la selección ya que son los que determinan la formación o desarrollo de microorganismos y por otro lado la fuerza máxima requerida impacta directamente en la aceptación de un producto.

### 3.1.3 Establecimiento de las temperaturas de proceso

Para el establecimiento de las temperaturas de trabajo se fijó la temperatura ambiente (20 °C aprox.) como la temperatura menor, esto por las ventajas operacionales y económicas que representa para el proceso, ya que al ser ambiente no requiere energía externa extra para la elevación o disminución de la temperatura. Para la temperatura mayor de trabajo se realizó una simulación del proceso calentando el jarabe por espacio de 6 horas a diferentes temperaturas analizando las características finales de sólidos solubles (° Bx) máximos alcanzados y apariencia. Los resultados se muestran en la Cuadro 6.

*Cuadro 6. Resultados obtenidos para selección de la mayor temperatura después de 6 horas de calentamiento.*

Tipo de azúcar en la solución	Temperatura (°C)	°Bx alcanzados	Apariencia	Observaciones
Glucosa	40	50	Color claro	-----
Glucosa	50	62	Color claro	Se torno turbia la solución
Glucosa	60	76	Amarillento	Se cristalizó en el fondo
Sacarosa	40	58	Color claro	-----
Sacarosa	50	61	Color claro	La solución presentó formación de burbujas
Sacarosa	60	73	Café	Se presento el olor característico a caramelo

Al someter a calentamiento las soluciones se observó que el comportamiento del jarabe se modificaba gradualmente con el aumento de la temperatura, en el caso de ambos jarabes a 60 °C se presentaron problemas de apariencia como la caramelización y cristalización de soluto en el fondo del recipiente. En lo que respecta al oscurecimiento por caramelización, constituyó un problema ya que este jarabe en el proceso aportaba además de sólidos, un oscurecimiento a la fruta la cual al final no era muy atractiva a la vista, por otro lado en estas soluciones fue difícil mantener la concentración del jarabe.

Las soluciones a 40 °C después del tiempo de prueba, presentaron buenas características de apariencia final. Las soluciones que se sometieron a 50 °C presentaron turbidez (glucosa), esto se le atribuye a que; no fue suficiente la agitación utilizada para obtener una disolución homogénea ó a una sobresaturación de la disolución provocada por la disminución de la temperatura. Para el caso de la disolución de sacarosa la formación de burbujas sin llegar a espumar no representó ninguna inconveniencia para ser utilizada a esa misma velocidad de agitación. Se decidió utilizar la temperatura de 50° C ya que fue la mayor temperatura a la que el jarabe se comporto de una manera estable, además de ser una solución en la cual fue relativamente fácil controlar la concentración.

### **3.2 ESTUDIO CINÉTICO DEL PROCESO**

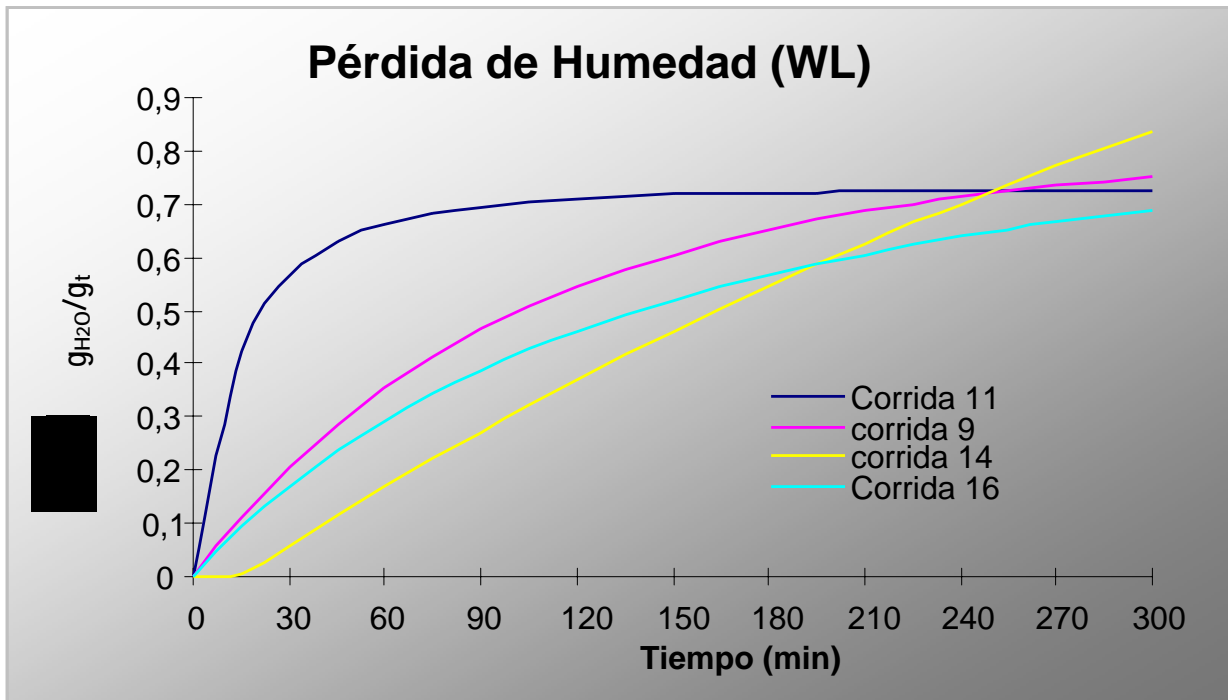
Una vez seleccionados los parámetros a alcanzar se realizó la experimentación aplicando la metodología de Taguchi. El estudio cinético se realizó desde el punto de vista de la obtención de un producto de baja humedad, sin que este llevara consigo el resultado más alto de los demás parámetros. En el Cuadro 7 se presentan los resultados de todos los parámetros obtenidos, los cuales se analizaron de manera separada.

*Cuadro 7. Parámetros calculados en la deshidratación osmótica, según el diseño ortogonal I16 de taguchi.*

Corrida	Ganancia de Sólidos SG (g <sub>s</sub> /g <sub>tot</sub> )	Perdida de Humedad WL (g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	humedad final *(g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	Humedad de equilibrio (g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	Coefficiente de Difusión (m <sup>2</sup> /s)
1	0,16927	0,3236	2,0075	0,9881	2,28E-10
2	0,0562	0,1996	3,4825	3,31	2,03E-09
3	0,1754	0,3465	1,5587	0,6608	1,77E-10
4	0,1214	0,2193	2,8662	2,826	2,03E-09
5	0,2042	0,476	1,3033	0,9516	1,01E-09
6	0,244	0,4569	0,9999	0,7196	2,53E-10
7	0,1233	0,1982	2,3907	0,8737	6,08E-10
8	0,2893	0,415	1,1789	0,4511	2,53E-10
9	0,2475	0,7502	0,3835	0,229	5,07E-10
10	0,2546	0,396	1,12	0,7987	1,01E-09
11	0,1829	0,6879	0,3789	0,3783	1,01E-09
12	0,2106	0,2916	1,8489	0,6297	9,12E-10
13	0,3225	0,547	0,7851	0,6876	2,03E-09
14	0,5798	0,8353	1,0208	0,0026	7,60E-10
15	0,2486	0,3772	1,19	0,2633	9,12E-10
16	0,4512	0,7244	0,3554	0,1598	5,07E-10

### 3.2.1 Perdida de humedad (WL) y humedad final.

Se analizaron las corridas que obtuvieron la menor humedad final al cabo de 5 h. de proceso. Para obtener una golosina con baja humedad, el parámetro más importante fue la humedad final del producto. A continuación se presentan dos Figuras (13 y 14) que describen el comportamiento del contenido de humedad, según Cuadro 7.



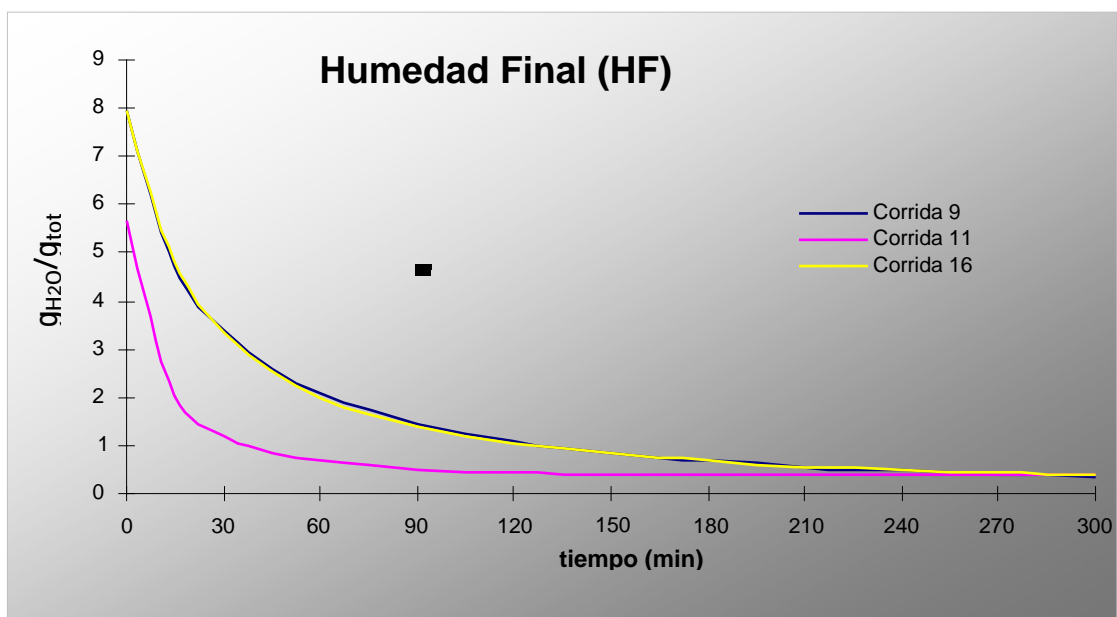
*Figura 13. Corridas con mayor pérdida de humedad a 0.6 g<sub>H2O</sub>/gt*

La Figura 13 muestra el comportamiento de las 4 corridas que obtuvieron la mayor pérdida de agua. Lo primero que se observa es que las cuatro corridas presentadas en la grafica fueron procesadas a concentración alta y espesor menor (según Cuadro 3). Esto concuerda con lo reportado en la literatura en la que se menciona que la concentración es la fuerza motriz de la DO (Moreira R, 2003; Mújica-paz, 2003; Rastogi, N. et al, 2002) el espesor esta relacionado con los tiempos de proceso. Por un lado La corrida 14 fue la que mayor pérdida de humedad tuvo, pero como se observa en el Cuadro 7 también permitió la entrada de una cantidad considerable de sólidos lo que provocó que no alcanzara una humedad final baja. En orden de importancia la corrida 9 también tuvo una importante pérdida de humedad disminuyendo la cantidad de sólidos ganados en poco mas del 50 % esto se debió principalmente a la temperatura a las que fueron procesadas y a la suma de los factores como: tipo de fruto, tipo de corte y presión, aunque tuvieron una influencia menor. La temperatura tuvo mayor influencia para que la corrida 14 obtuviera una cantidad alta de sólidos, ya que a temperatura elevada existe una importante perdida de la selectividad de la membrana celular, además de existir un aumento de

la energía cinética de las moléculas de la solución osmótica y al adquirirse mayor movilidad se traduce en una disminución de la viscosidad de la solución que tiene mayor facilidad para ingresar al interior del tejido, lo que aumentó la presión osmótica beneficiando a la DO (Mújica - Paz, 2003).

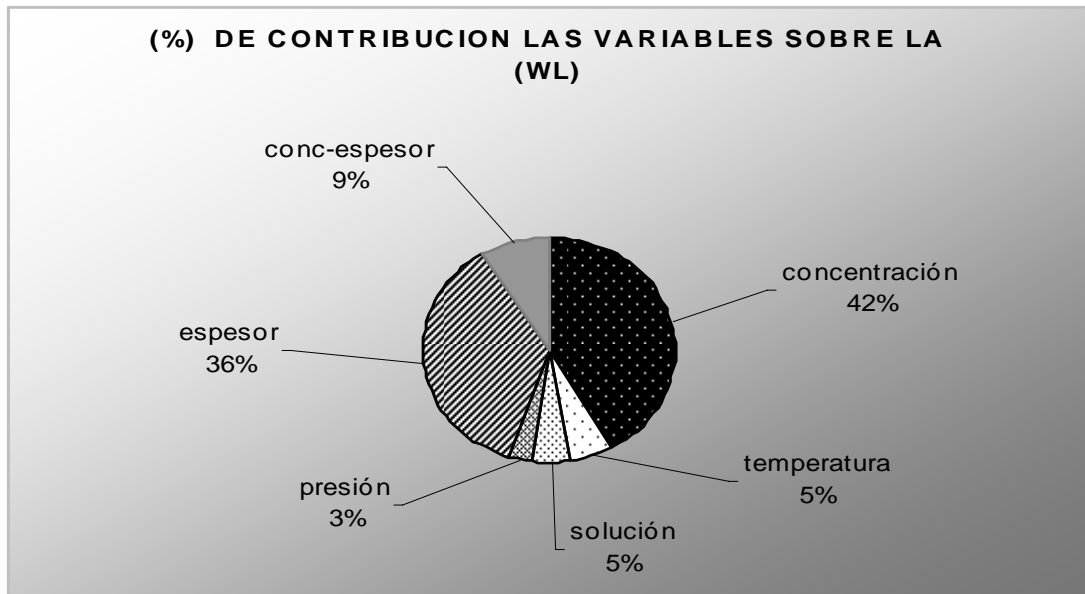
Por otro lado tenemos a la corrida 11 que alcanzó el equilibrio con la solución osmótica. Esto es importante ya que permite saber en que momento se puede detener el proceso sin que repercuta en los gastos energéticos del proceso. Por último se encuentra la corrida 16 que obtuvo la humedad final mas baja de toda la experimentación alcanzando  $0.3554 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$  esto fue debido principalmente a que a diferencia de las dos primeras corridas (14 y 9) estas ultimas (16 y 11) fueron procesadas con solución de peso molecular alto, lo que facilitó la salida de las moléculas del agua que son de menor peso molecular que los solutos (glucosa y sacarosa) además de lo ya mencionado sobre la temperatura para el caso de la corrida 16.

En la siguiente figura ya no se presenta la corrida 14, debido a que la cantidad de sólidos que ingresaron al tejido del alimento no le permitió alcanzar una baja humedad. Solo se presentan las corridas 9, 11 y 16. Se puede observar que la mayor parte de la humedad se pierde dentro de las dos primeras horas.



*Figura 14. Corridas con menor humedad final a  $0.40 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{ss}}$ .*

En la Figura 15 se presenta el porcentaje (%) de contribución de las variables sobre la pérdida de humedad, el cual fue obtenido mediante el programa "ANOVA 2003 Taguchi Methods"



*Figura 15. Porcentaje de contribución de las variables, sobre la pérdida humedad.*

Se observa que la WL fue afectada principalmente por: la concentración y el espesor. Las dos principales variables (por encima del 10% de contribución) la concentración con una contribución del 42%, el espesor con una contribución del 36%. Con respecto a la concentración, se puede decir que el resultado obtenido refleja un comportamiento lógico, ya que a mayor gradiente de concentración, mayor es la velocidad de transferencia de masa, y si además, esta se lleva a distancias más cortas (espesores menores), disminuye el tiempo de proceso. Se observó que el espesor según figura 15 tuvo un aporte de contribución mayor que la temperatura.

### **3.2.2 Ganancia de sólidos (SG).**

El proceso de deshidratación osmótica como ya se mencionó anteriormente, es un proceso de remoción de agua provocado por el ingreso de sólidos disueltos en una solución hipertónica. Por lo que la ganancia de sólidos fue un parámetro importante de medir en la DO.

Si se observa el Cuadro 7 se ve que existe una serie de corridas que obtuvieron una baja ganancia de sólidos y que fueron procesadas a baja concentración (2, 4, 7 y 3) pero que no se presentan en la Figura 16. La razón fue por que no se obtuvo una humedad final cercana a la deseada de  $0.25 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$ . Esto confirma el hecho de que la concentración es la fuerza motriz de la DO. Por otro lado vemos que de todas las corridas de la experimentación las corridas que mayor SG obtuvieron fueron las corridas que se procesaron a temperatura elevada, según Cuadro 7 (8, 13, 16 y 14), se pueden mencionar que la temperatura fue un factor importante en la ganancia de sólidos. Esto concuerda con lo observado por Mújica-Paz, (2003) donde afirma que la DO es proporcional a la concentración y temperatura, contrario a lo reportado por Rastogy - Raghavarao (2004), que manifiestan que la ganancia de sólidos se ve favorecida por bajas concentraciones de la solución osmótica de bajo peso molecular. Los resultados obtenidos bajo las condiciones de proceso en esta experimentación, nos permite ver que el peso molecular es un factor importante para el ingreso de sólidos, siendo la corrida 14, la que mayor ganancia de sólidos obtuvo de toda la experimentación y que fue procesada con concentración alta de bajo peso molecular, a diferencia de las corridas (13 y 16) que fueron procesadas con una solución de alto peso molecular.

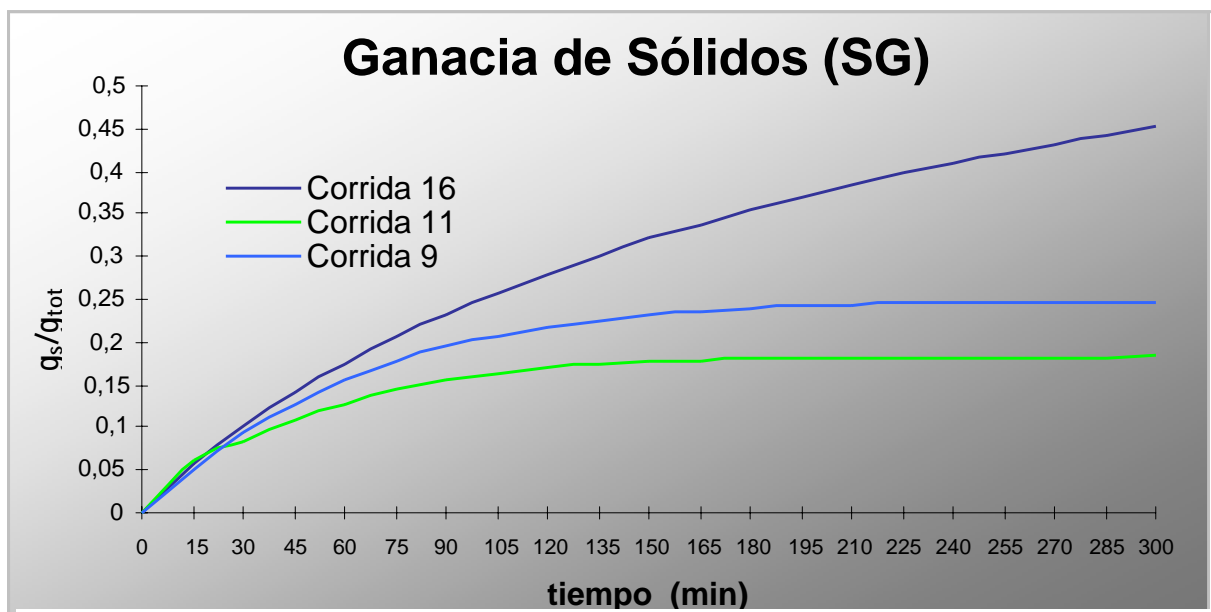
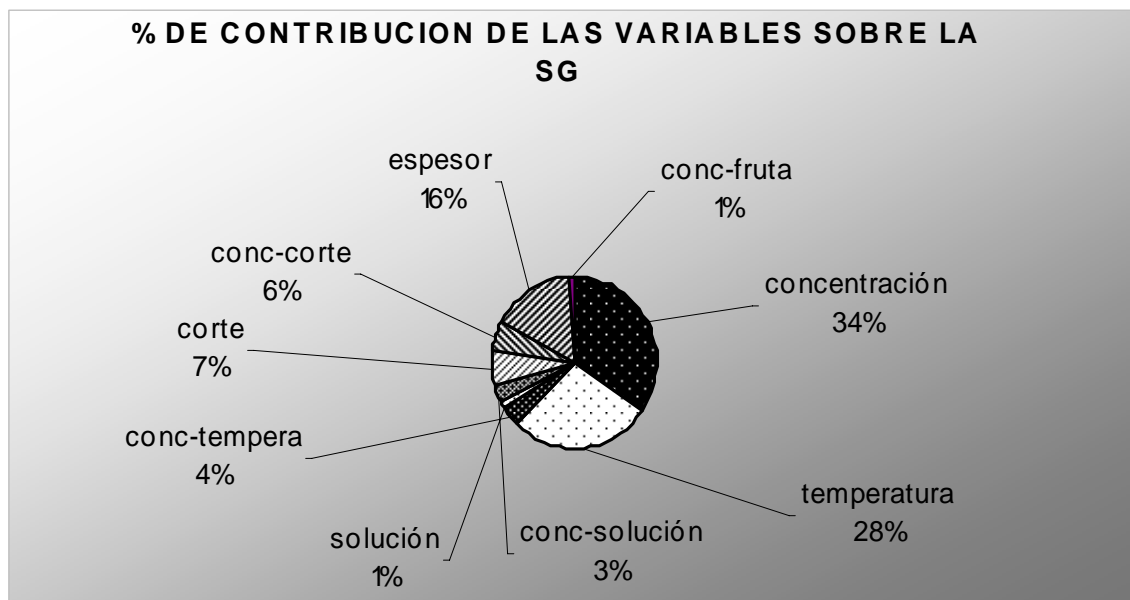


Figura 16. Corridas con mayor ganancia de sólidos a  $0.17 \text{ gs/g}_t$  y baja humedad.

La Figura 16 presenta las corridas que obtuvieron una ganancia de sólidos mayor a 0.17 gs/gt con menor humedad final. Estas fueron: 11, 9 y 16 en forma ascendente las cuales obtuvieron un valor de 0.1829, 0.2475 y 0.4512 gs/gtot respectivamente. Como se puede ver, la mayor ganancia de sólidos se alcanzó dentro de las 2 primeras horas de proceso, tornándose despreciable las tres horas restantes (corridas 11 y 9). Esto fue debido a que ambas corridas fueron procesadas a temperatura ambiente a diferencia de la corrida 16 que fue procesada a temperatura elevada, el cual se reflejó en un incremento en la ganancia de soluto.

En la Figura 17 se muestra el (%) de contribución de las principales variables sobre el efecto de la ganancia de sólidos.



*Figura 17: Porcentaje de contribución de las variables sobre la SG.*

El análisis estadístico de Taguchi referente a la SG muestra que el fenómeno se vio afectado principalmente por tres factores que contribuyeron con un porcentaje por encima del 10 %. La concentración, el cual contribuyó con un 34 %, seguida por la temperatura que contribuyó con un 28 % y finalmente por el espesor la cual contribuyó con un 16 %. Como se observa en esta misma Figura 17, la temperatura toma mayor relevancia en la SG. La unión de estos factores provocó que el ingreso de



sólidos se incrementara (corrida 16), aun habiendo sido procesada con solución de peso molecular alto. De tal forma que si lo que se desea es deshidratar sin obtener una gran cantidad de sólidos, conviene procesar las corridas a temperatura ambiente. Por otro lado se pudo observar en la Figura 17 que el tipo de solución, corte y tipo de fruto bajo estas condiciones de proceso no tuvieron una contribución significativa, ya que el promedio de contribución del estos factores es de 3.5 % por factor ó por interacción de algunos de ellos.

### 3.2.3 Coeficiente de Difusión (D).

En la experimentación se calcularon valores de coeficientes de difusión que reflejan el desempeño global de la difusión del agua dentro del fruto, hacia el jarabe. Para esto fue necesario hacer uso de la humedad de equilibrio, la cual fue específica para cada corrida (por encima de las 25 hrs.) con la ayuda del higrómetro de punto rocío. Cabe mencionar que en las 5 primeras horas de proceso, el análisis se llevo acabo cada 15 min. Posteriormente las lecturas de humedad se realizaron cada hora y son las reportadas en el cuadro 7.

En la Figura 18 se muestra una grafica, de cuyas pendientes se obtiene el coeficiente de difusión para las corridas 9, 11, 13 y 16

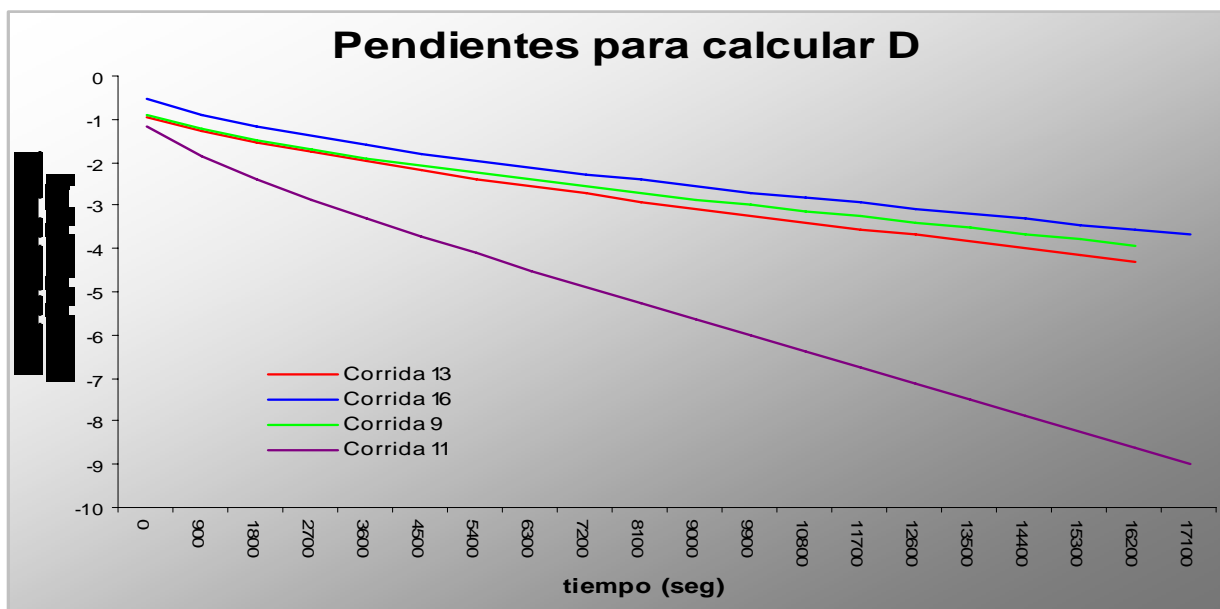


Figura 18: Representación grafica de los coeficientes de difusión con humedad final menor a  $0.8 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$

Se presentan sólo las corridas que tienen un contenido de humedad final por debajo del  $0.80 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$ , donde se puede ver la diferencia que tiene la corrida 11 en comparación con las otras tres corridas. El Cuadro 7, muestra las corridas (2 y 4) con un coeficiente igual al de la corrida 13 ( $2.03 \text{ E-9}$ ), superior al de la corrida 11 ( $1.01 \text{ E-9}$ ) pero no se presentan por no tener una humedad final baja.

Lo esperado era que las corridas con un coeficiente de difusión alto fueran las correspondientes a las de concentración alta y estas a su vez alcanzaran el contenido de humedad mas bajo, pero los resultados no confirman lo anterior. Esto puede atribuirse a errores experimentales o a que el ajuste realizado a los datos experimentales obtenido para la linealizar las graficas  $\ln [ ]$  vs  $t$  para obtener  $D$  pudo haber afectado en los valores calculados. Sin embargo todos ellos entran en el orden de magnitud reportados para difusión de sólidos en la literatura (Rastogi, 2002; Amami, 2006; Spazzi, 2001). Por otro lado la Figura 18 muestra que la diferencia que existe entre los ( $D$ ) de la corrida 13 y corrida 11 es muy pequeño, pero que es lo suficientemente grande para determinar el tiempo de proceso. Lo anterior lo confirma la corrida 11 que alcanzó el equilibrio con la solución en 2 hrs. A continuación se presenta la Figura 19 que muestra el (%) de contribución de las variables sobre ( $D$ ).

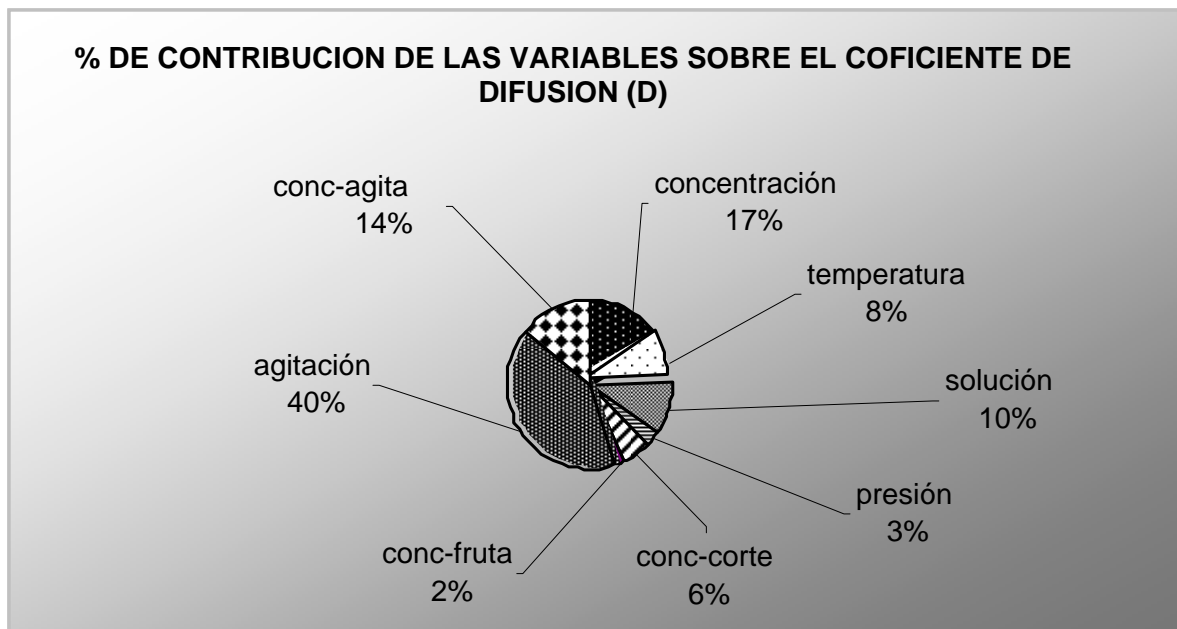


Figura. 19 Porcentaje de contribución de las variables sobre  $D$ .

Como se puede observar en la Figura 19 la difusión fue afectada principalmente por 3 variables, las cuales contribuyeron con un porcentaje mayor al 10 %. En primer lugar tenemos a la agitación como variable principal con una contribución del 40 %, que estuvo presente en tres de las cuatro corridas presentadas en la Figura 18. Esto se puede explicar desde el punto de vista de la homogeneidad de la solución, es decir que mantiene distribuidos los solutos, además de eliminar la capa limite que se forma conforme transcurre el tiempo, debido a la salida de las moléculas de agua que rodean la interfase entre el fruto y la solución osmótica.

En segundo lugar se tiene una interacción entre la concentración y la agitación, las cuales suman una importante contribución del 31 %. Por ultimo se tiene el tipo de solución que debido a la permeabilidad de la membrana, presentó mayor dificultad para ingresar al interior del tejido del fruto dejando salir las moléculas de agua que son de menor peso molecular.

### 3.2.4 Comportamiento de WL y SG.

A continuación se presenta la Figura 20 que describe el comportamiento de la WL y SG sobre las dos mejores corridas del arreglo ortogonal Taguchi.

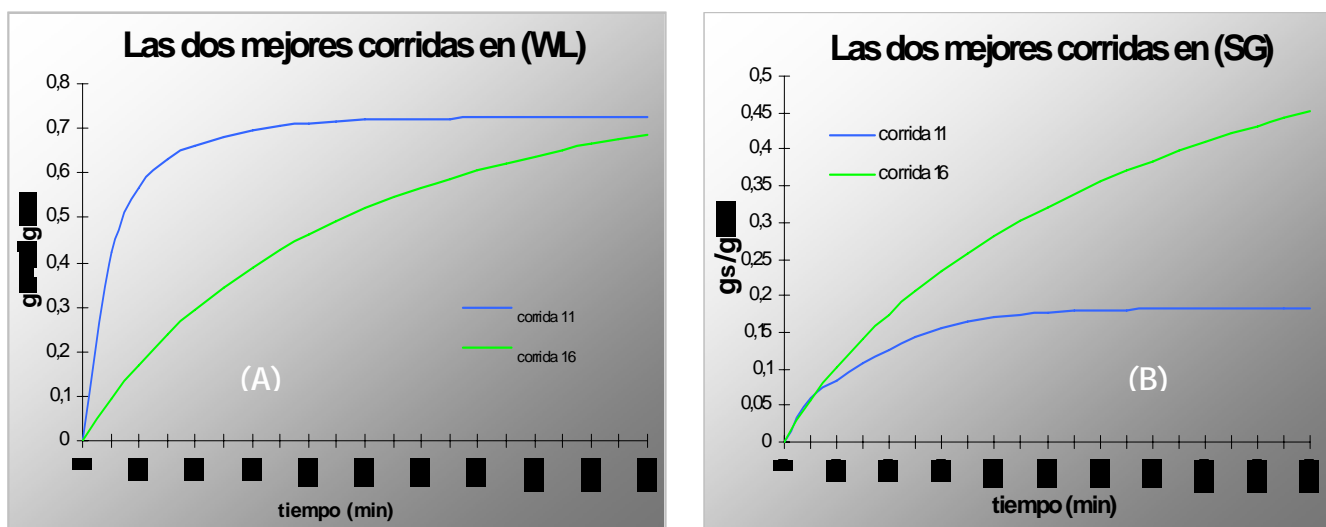


Figura. 20 Las 2 mejores corridas en: Perdida de humedad (A) y Ganancia de sólidos (B).

Se observa que conforme se pierde agua los sólidos ingresan, aunque en menor cantidad, dado que tienen mucho mayor peso molecular y por ello menor facilidad de transporte a través de la membrana celular.

De las dos corridas ya mencionadas se seleccionó a una de ellas como la mejor del arreglo ortogonal Taguchi: por un lado la corrida 11 obtuvo una importante pérdida de humedad y con baja ganancia de sólidos, solo superada por la corrida 16 por  $0.2 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_t$ , en lo que se refiere a pérdida de humedad, según Cuadro 7.

Si se observa el Cuadro 3 de la Pág. 49. La corrida 11 no tiene la posibilidad de disminuir más su contenido de humedad, debido a que fue procesada a temperatura baja. En cambio la corrida 16 que fue la que obtuvo la mayor pérdida de humedad tiene la posibilidad de disminuir su contenido de humedad final si se procesa a temperatura baja, sin que obtenga una gran cantidad de sólidos y con la posibilidad de alcanzar o superar el valor del coeficiente de difusión obtenida por la corrida 11, de tal manera que se seleccionó la corrida 16 como la mejor.

En resumen se puede decir que en tratamientos osmóticos la mayor transferencia de masa se consigue dentro de las dos primeras horas. De tal manera que si lo que busca es deshidratar un alimento sin alcanzar una gran cantidad de sólidos, es recomendable detener el proceso dentro del tiempo mencionado.

### **3.2.5 Niveles recomendados por el análisis Taguchi.**

Una vez terminada la experimentación, los datos fueron analizados en el programa ANOVA 2003; Taguchi Method, mediante el cual se obtuvieron los niveles recomendados que se muestran a continuación en el Cuadro 8 el cual busco mejorar la velocidad del proceso con las siguientes características: aumentar la pérdida de humedad, disminuir la ganancia de sólidos y obtener el mayor valor del coeficiente de difusión.

*Cuadro 8. Niveles recomendados por el análisis estadístico de Taguchi*

Variable	Nivel recomendado	Equivalente a: (Condiciones optimas)
Concentración	Alto	60 °Bx
Temperatura	Bajo	20 °C
Tipo de solución	Alto	sacarosa
Presión en el sistema	Bajo	29 cm. Hg
Tipo de corte	-----	-----
Espesor	Bajo	1 cm.
Fruto	-----	Piña
Agitación	Alto	2600 rpm.

Nota: (--) No recomienda un nivel en específico.

Con estas condiciones se realizó una nueva corrida a la que se denominó “corrida ideal” y dicha corrida fue analizada desde el mismo punto de vista que las del arreglo ortogonal y contrastada contra la mejor corrida (16). El Cuadro 9 muestra los resultados obtenidos de las 2 corridas analizadas y la mejora que tuvo “la corrida ideal” con respecto de la corrida 16. Se pudo observar que para los dos parámetros de proceso de la deshidratación osmótica, la WL y SG se obtuvo una mejora considerable ya que se consiguió disminuir la cantidad de sólidos ganados así como la humedad final del producto. La disminución del 43.01% del contenido de sólidos confirma que la temperatura es la de mayor influencia en la ganancia ó disminución de sólidos.

*CUADRO 9: Comparación de resultados de la mejor corrida Vs la ideal*

Evento	SG (g <sub>s</sub> /g <sub>tot</sub> )	WL (g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	(humedad Final g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	Humedad de equilibrio (g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> )	D (m/S <sup>2</sup> )
Corrida No 16	0,4512	0,7244	0,3554	0,1598	5,07E-10
Corrida ideal	0.2571	0.7953	0.2855	0.205	1.10E-09
Mejora de corrida ideal.	43.01%	9.78%	20%	25.15%	81.380%

### 3.3 ESTUDIO TEXTURAL Y MICROSCÓPICO

#### 3.3.1 Análisis de textura.

Para el cumplimiento del objetivo particular dos se realizó el análisis de la estructura del fruto fresco y procesado lo que nos llevó al estudio del comportamiento textural en pruebas mecánicas así como el registro del comportamiento de la estructura celular del fruto la cual está ligada al daño de los tejidos debido a las condiciones de proceso.

Debido a que la investigación se realizó con dos frutos diferentes, el análisis se llevo acabo por separado para cada tipo de tejido. Se presenta a continuación el Cuadro 10 donde se reportan los valores obtenidos de las 8 corridas correspondientes a manzana del arreglo ortogonal Taguchi.

*CUADRO 10. Lecturas de carga máxima requerida en manzana a 5 hrs. de proceso.*

Evento	Carga máxima requerida para la penetración. (kN)
Valor mínimo	0.394
Corrida 2	0.6047
Corrida 3	0.1214
Corrida 6	0.0607
Corrida 7	0.4541
Corrida 10	0.3934
Corrida 11	0.0292
Corrida 14	0.2427
Corrida 15	0.2113

Como se puede observar en el Cuadro 10 los valores obtenidos por encima del mínimo 0.39 kN (ver actividades preliminares pág. 56) corresponden a las corridas 2, 7, 10 y 15. Estas corridas fueron procesadas con medidas de 2 x 2 x 16 según (Cuadro 3).

De tal manera que se hace evidente que el espesor es el factor más importante en este análisis. Si comparamos las corridas, 10 y 2; 15 y 7 se puede observar que entre ambas parejas de corridas, sólo se diferencian en la concentración según Cuadro 3. Por otro lado; las primeras fueron procesadas a temperatura ambiente, mientras que las segundas a 50° C. Esto fue importante por que se observó que la combinación de estos dos factores toma gran relevancia en la textura del alimento. Ya que en espesores menores, con mayor concentración y con mayor temperatura existe un mayor daño en la pared celular, que se refleja en una textura más reblandecida y que pone menor resistencia a la fractura. En cambio las corridas que fueron procesadas a menor concentración y menor temperatura, guardan más la dureza original que las otras.

Lo anterior muestra un comportamiento lógico si consideramos que a alta temperatura existe ya cierta solubilidad de la pared celular principalmente de las pectinas, celulosa y hemicelulosa, compuestos que le proporcionan rigidez a la estructura de los alimentos (Mitchell, 1988).

El mismo efecto se vio reflejado en las corridas con espesor de 1 cm. (3, 6 y 11) a excepción de la corrida 14 que mostró un incremento en el valor de la carga máxima idéntico a la muestra modelo (0.2427 kN). Este efecto se atribuye al tiempo de reposo que tuvo la muestra cuando fue corrida en el texturometro, lo que permitió que la fruta se enfriara alcanzado así una sobresaturación del tejido y que comenzará el fenómeno de la cristalización, confiriéndole una mayor resistencia a la penetración ya que se pudo observar que pasado algunos días de reposo algunas muestras presentaban el fenómeno de sinéresis

Con lo respecta a las muestras de piña presentaron el mismo comportamiento. Se presenta a continuación el Cuadro 11 que muestra los datos obtenidos de todas las corridas que corresponden a piña, del arreglo ortogonal Taguchi.

Cuadro 11. Lecturas de carga máxima requerida de piña a 5 hrs. de proceso

Evento	Carga máxima requerida (kN)
Valor mínimo	0.394
Corrida 1	0.1506
Corrida 4	0.544
Corrida 5	0.3641
Corrida 8	0.1506
Corrida 9	0.3147
Corrida 12	0.7553
Corrida 13	0.5755
Corrida 16	0.0584

En el Cuadro 11 se puede observar que los datos que están por encima del mínimo corresponden a las muestras con espesor de 2 cm (corridas 4, 12, y 13) a excepción de la corrida 5 que esta ligeramente por debajo del mínimo. Esto puede ser atribuido a que fue procesada a temperatura alta ó, a que se le analizó inmediatamente después de ser sacada del proceso osmótico cuando el fenómeno de la cristalización todavía no empezaba.

En el caso de las muestras con espesor de 1cm la corrida 9 confirma que la temperatura tiene mayor influencia que la concentración en lo que respecta a la textura final del producto. En la Figura 21 se presenta una grafica que refleja el comportamiento de ambos frutos, de lo que hasta aquí se ha explicado.



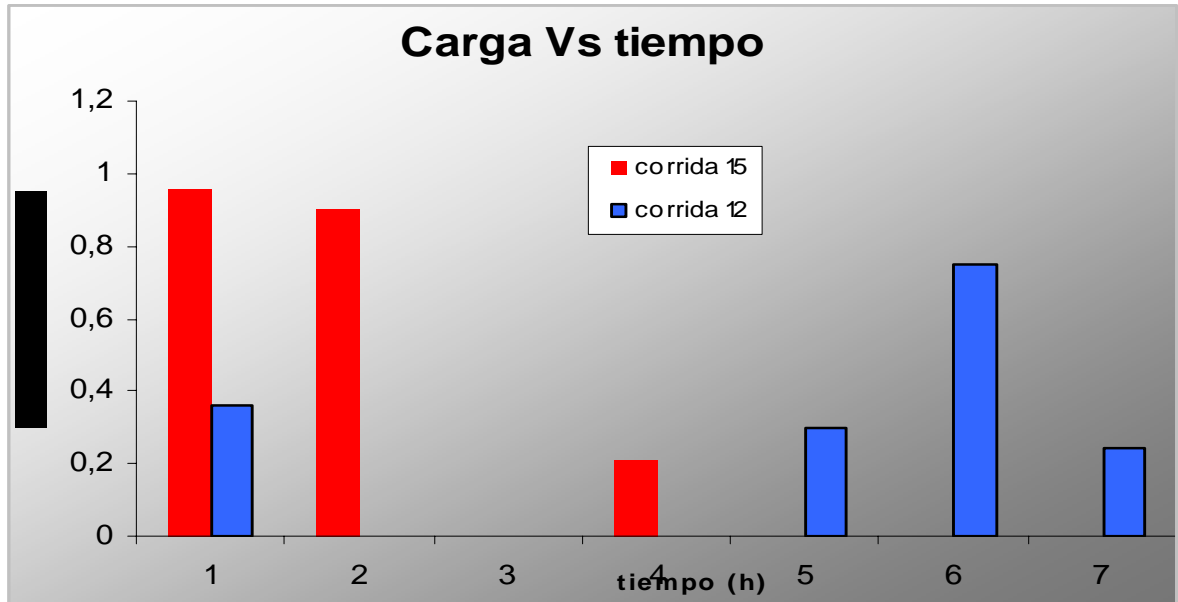


Figura 21. Representación grafica de carga máxima vs tiempo en corridas con 2 cm.

Debido a la complejidad de la experimentación y al número de experimentos realizados no fue posible obtener las muestras correspondientes a los tiempos mencionados en la parte de Materiales y métodos (2.3.7). De tal manera que en la Figura 21 se presentan 2 corridas. (15 y 12) que corresponden a manzana y piña respectivamente, donde se pudo observar que la dureza es mayor en el fruto al inicio del proceso y que ésta va decreciendo conforme avanza el tiempo. Si se observa la carga máxima de la corrida 15 que fue procesada a temperatura alta según Cuadro 3, se puede ver que existe una disminución en la carga máxima del 80%, lo que corrobora el hecho del reblandecimiento del tejido debido a la pérdida de la selectividad de la membrana celular, a diferencia de la corrida 12 que fue procesada a temperatura ambiente y que muestra incluso un aumento en la carga máxima del 110% aproximadamente. La razón a la que atribuimos este incremento es debido al tiempo de reposo que tuvo, una vez que fue retirada del proceso osmótico, lo que permitió que se diera paso al fenómeno de la cristalización confiriéndole una dureza mayor al producto.

Cabe señalar que aunque el software del equipo grafica carga máxima vs. desplazamiento. Se decidió graficar la carga máxima vs. tiempo de proceso. Como

una medida de la dureza del alimento conforme avanzaba el proceso. A continuación se presenta la Figura 22 que muestra las dos corridas de espesor de 1 cm. Más cercanas al límite inferior.

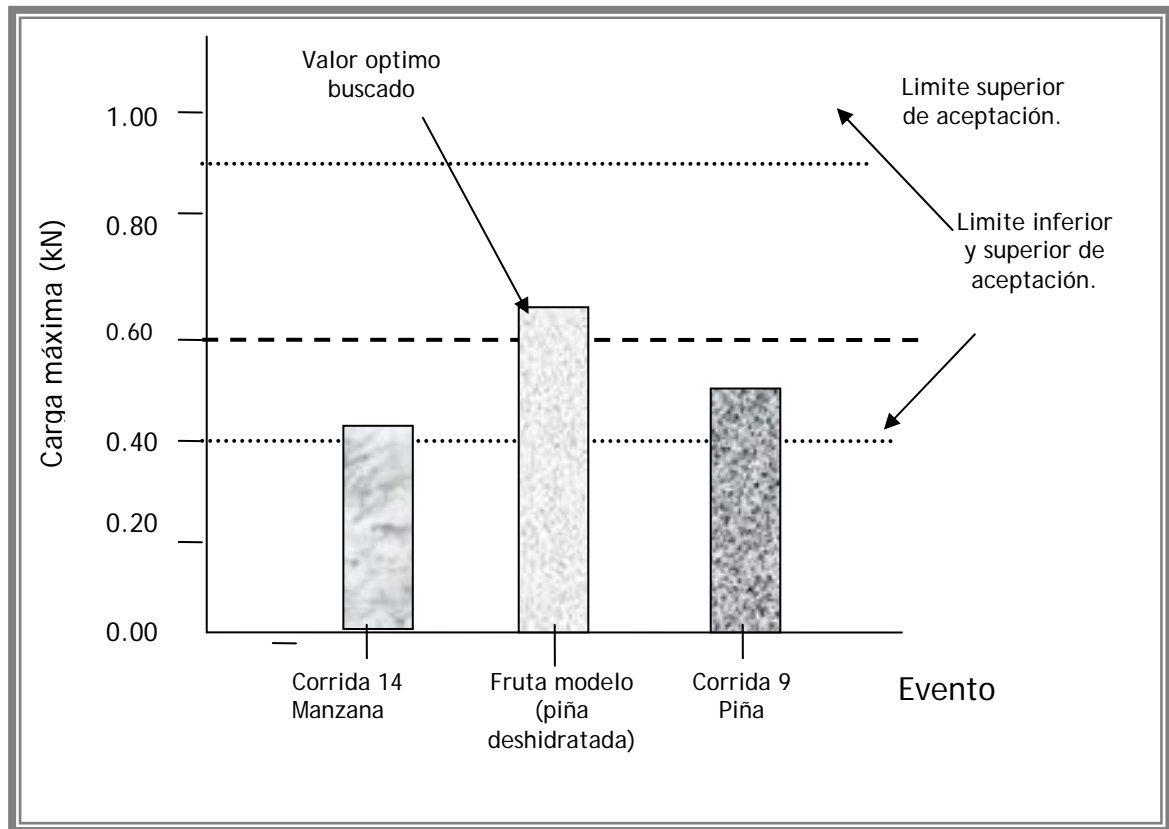


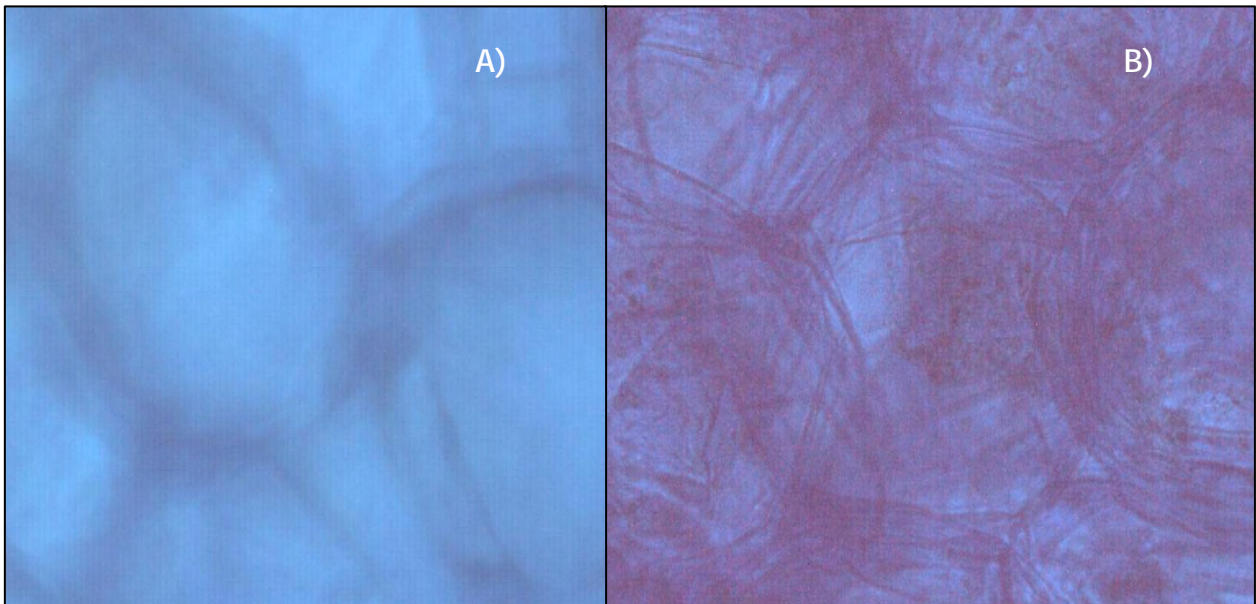
Figura 22. Corridas con carga máxima mayor a 0.2427 kN y espesor de 1 cm.

Es evidente que en esta etapa de la investigación no se alcanzó el valor óptimo deseado (600 kN) ya que como se puede ver en la Figura 22 solo una corrida por fruto alcanzó un valor cercano al límite inferior. Existen dos factores que pueden explicar lo anterior: el primero, si observamos el Cuadro 3 vemos que las dos corridas (14 y 9) aunque fueron procesadas a diferente temperatura y con el mismo tipo de jarabe (glucosa), la fruta modelo fue procesada con miel natural de abeja, lo cual corrobora el hecho de que el tipo de solución tiene un impacto sobre la textura del producto final. Segundo; al tiempo de reposo tiene una importancia relevante, ya que dependiendo el tiempo que haya estado reposada la muestra una mayor dureza debido al fenómeno de la cristalización.

### 3.3.2 Análisis óptico.

Una parte importante que viene a reforzar la parte textural del objetivo particular 2 es la que corresponde al análisis óptico que se presenta a continuación, donde se pudieron observar evidencias del fenómeno de la deshidratación osmótica sobre la estructura del tejido de la fruta.

El análisis que se presenta a continuación refleja el proceso global de la experimentación, sin que este obedezca a una corrida en específico. Debido a la complejidad del proyecto se tuvo la necesidad de realizar una selección de las fotografías más representativas del proceso osmótico y que justifican los valores obtenidos del análisis textural. Para la toma de fotografías se realizó en el microscopio óptico como se indica en la sección materiales y métodos (pág. 42) haciendo uso de dos tipos de colorantes (verde de malaquita y azul de bromocresol), los cuales proporcionaron el contraste adecuado que permitió llevar a cabo la observación de los elementos de interés.

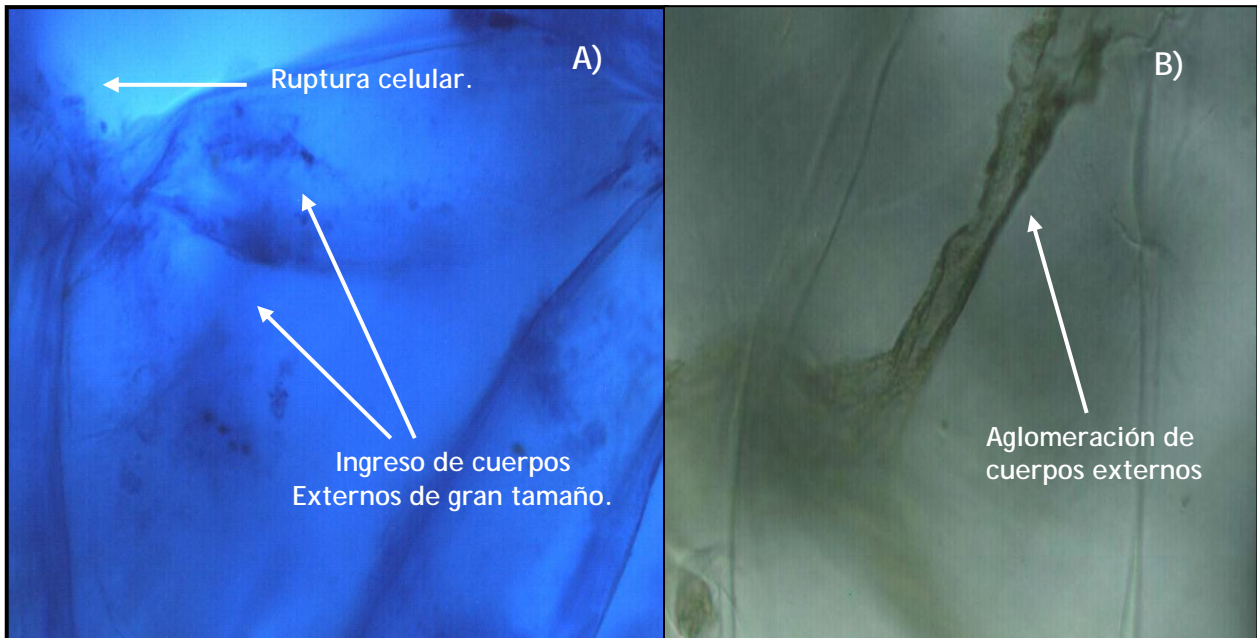


Micrografía (A). Tomada a piña fresca en microscopio óptico a 40X (corte transversal)

Micrografía (B). Tomada de Corrida 13 en microscopio óptico a 40X después de 5 hrs. de proceso osmótico. (Corte longitudinal)

*Figura 23. Ejemplificación de células de piña con diferente corte y tiempo de proceso.*

La Figura 23-A corresponde a una fotografía tomada a piña fresca donde se puede ver el orden que guarda las células unas con otras y la turgencia de las mismas, como se menciona en la explicación de la fotografía, el corte se realizó en forma transversal. Mientras que la fotografía 23-B refleja un corte longitudinal que deja ver la forma hexagonal de las células por un lado y por otro lado también permitió ver la pared celular de las mismas.



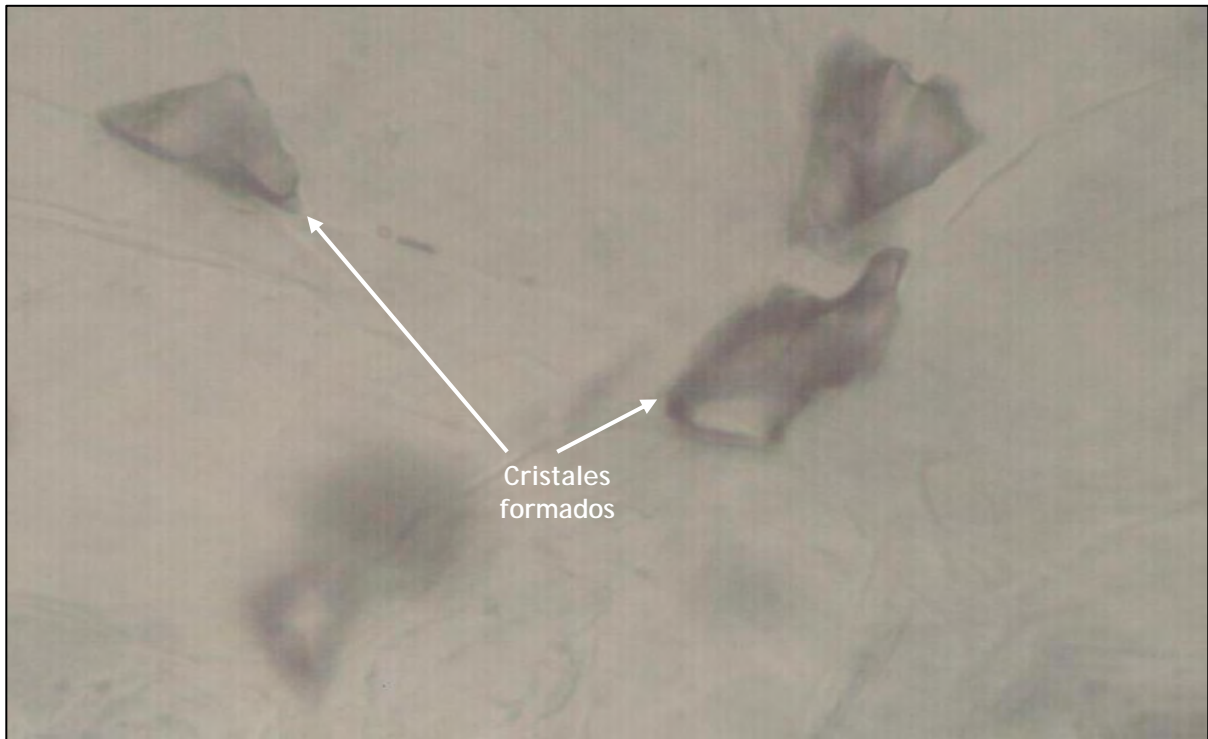
Micrografía (A). Tomada a manzana en microscopio óptico a 40X después de 5 hrs. de proceso osmótico (corrida 14).

Micrografía (B). Tomada a manzana en microscopio óptico a 40X después de 8 horas de proceso osmótico (corrida 14).

*Figura 24. Ejemplificación de células de manzana a diferentes tiempos de proceso*

La Figura 24 muestra tejido de manzana a diferentes tiempos de proceso (corrida 14), en el cual se puede observar el daño celular causado por el ingreso de sólidos de la solución osmótica. En la Figura 24-A se observa en la parte superior izquierda de la célula como existe un desgarre de la pared celular donde se ve aparentemente la salida de jugo celular. Por otro lado en esta misma figura se alcanza a ver una deformación parcial de las células, las cuales contienen muchas zonas oscuras provocadas por el ingreso de soluto osmótico. La Figura 24-B corresponde a una

fotografía tomada a la misma corrida de manzana, sólo que a mayor tiempo de proceso, donde se pudo ver la aglomeración de cuerpos externos que se encontraron dentro del tejido de la fruta y que al igual que 24-A presentó zonas oscuras pero de mayor radio, los cuales consideramos que corresponden a los sólidos ganados de la solución osmótica, que en este caso fue glucosa según (Cuadro 3).

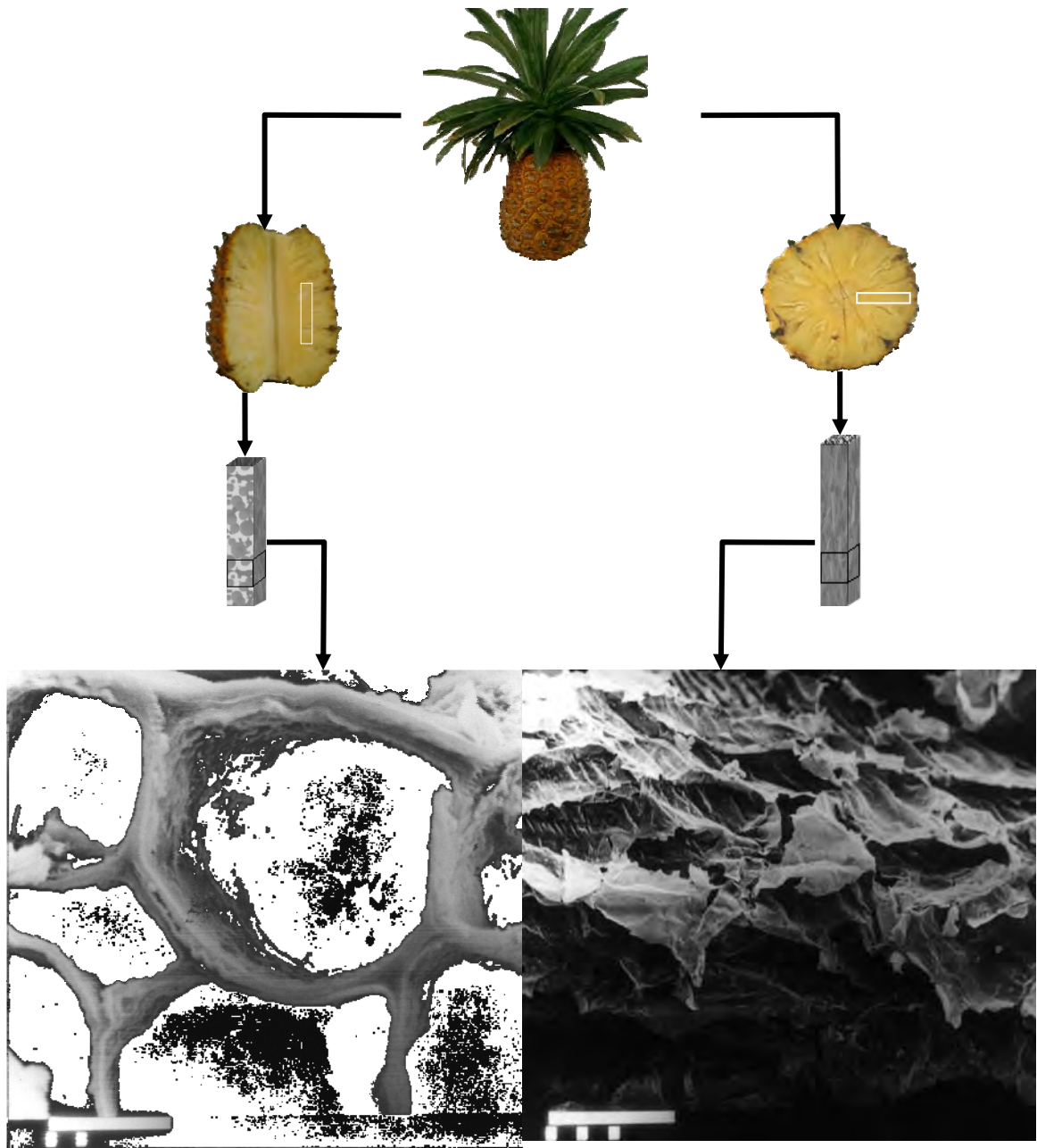


Micrografía tomada a corrida 12 (piña) en microscopio óptico a 40X después de 9 hrs. de proceso osmótico

*Figura 25. Ejemplificación del fenómeno de cristalización en piña.*

La Figura 25 es un claro ejemplo del fenómeno de la cristalización que tuvo lugar una vez que existió una sobresaturación de la célula acompañada de una disminución de la temperatura al finalizar el proceso, debido al reposo que tuvo en la cámara de refrigeración que ayudó a la rápida formación de cristales. La Figura 25 facilita la explicación del comportamiento de la corrida 12 (figura 21) donde se observó un incremento de la carga máxima después de 6 hrs. de proceso.

La Figura 26 representa los dos cortes utilizados en la experimentación, que también sirvieron para las fotografías requeridas en el microscopio electrónico de barrido MEB



Micrografía lateral del corte longitudinal al eje de piña fresca (2000X).

Micrografía lateral del corte transversal al eje de piña fresca (1000X).

*Figura 26. Esquematización de cortes longitudinal y transversal de piña en (MEB).*

### 3.4 COMPARACIÓN DE PROCESOS: DO VS. SECADO CONVECTIVO.

#### 3.4.1 Contenido de Humedad.

Para cubrir este objetivo se realizaron dos corridas para la comparación del método osmótico con respecto del secado convectivo. La corrida utilizada para la deshidratación osmótica fue la "corrida ideal". Por otro lado la corrida de secado convectivo fue realizada en un horno de convección forzada con aire a 1.4 m/s y 70°C y con la finalidad de que ambos productos obtuvieran las mismas condiciones finales, se realizó un balance de materia y se le adicionaron (2.8 g) de azúcar pulverizada a la muestra fresca que se iba a someter al secado convectivo. (El azúcar fue puesta en la cara del corte longitudinal para favorecer la penetración de los sólidos) posteriormente después de 15 minutos de reposo se sometió al proceso convectivo obteniéndose la grafica mostrada en la Figura 27.

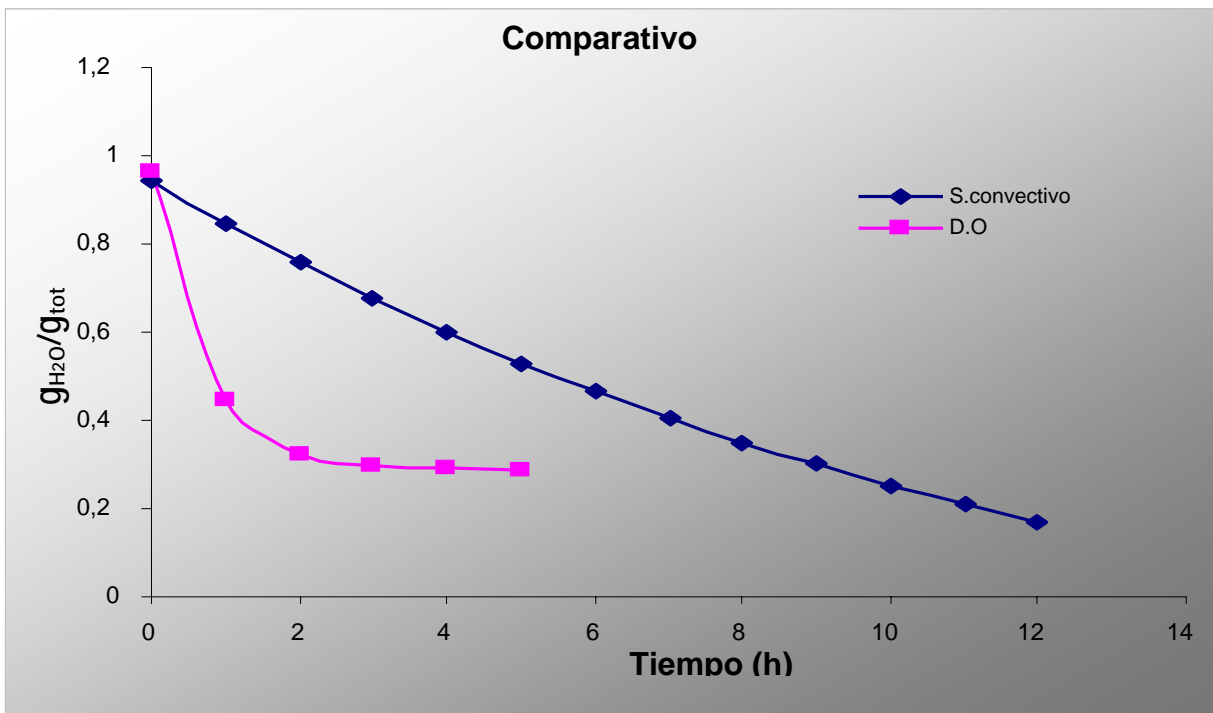


Figura 27. Contenido de humedad en DO y secado Convectivo.

En esta figura se puede observar la evolución del contenido de humedad de la piña, por un lado se observa que la humedad final al cabo de 5 hrs de proceso fue de 0.52

$g_{H_2O}/g_{tot}$ . En la corrida deshidratada osmóticamente fue de 0.28  $g_{H_2O}/g_{tot}$ . Por otro lado se aprecia que para la muestra procesada osmóticamente la pérdida de humedad se vuelve despreciable después de la segunda hora, en cambio para la corrida de secado convectivo después de 12 hrs. seguía bajando.

Esta diferencia en los tiempos de deshidratación se debe a que en el proceso osmótico el agua es desplazada fuera del alimento por sólidos que penetran en las células del sistema de manera casi simultánea, la salida del agua se realiza sin un cambio de fase. Lo que facilita su evacuación. Esta comienza casi de manera inmediata al inicio del proceso, por otro lado la presión de vacío utilizada abre los tejidos del fruto lo que ayuda a eliminar los gases ocluidos que dificultan la transferencia de masa.

Lo anterior lo podemos observar en esta misma Figura 27 ya que se puede ver claramente como en las dos primeras horas de proceso la corrida sometida a deshidratación osmótica ha tenido una pérdida de humedad mucho mayor que la que fue sometida a secado convectivo. La corrida de proceso osmótico logra perder 66.15% de su humedad total en las primeras dos horas mientras que por medio del secado convectivo serian necesarias aproximadamente nueve horas para lograr este mismo porcentaje de perdida.

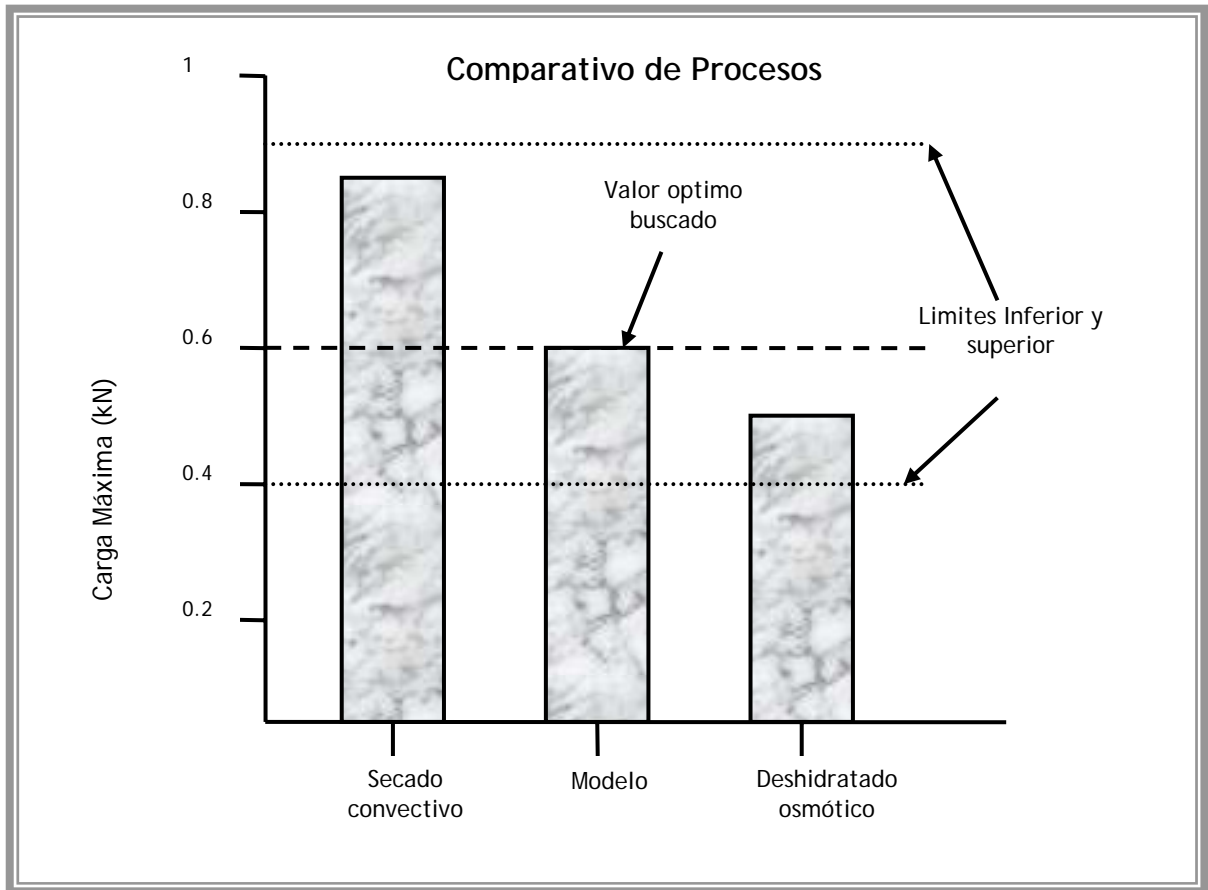
#### **3.4.2 Análisis de textura**

En el proceso de secado convectivo el aire dentro del tejido actúa como barrera para la transferencia de masa, además de esto, el agua en este proceso abandona el alimento en forma de vapor (con cambio de fase y por consiguiente mayor necesidad energética), lo que hace que el liquido primero se caliente hasta alcanzar una temperatura de evaporación y posteriormente busque el equilibrio barométrico con la atmósfera exterior.

Un fenómeno característico del proceso de secado es la resequedad en la superficie de la muestra por la acción del calor haciendo así más difícil la salida de agua de la muestra, lo que además de dificultar la transferencia de masa hace parecer el



producto mas difícil de masticar de tal manera que en este tipo de tejidos el proceso osmótico aporta mejores características finales al producto.

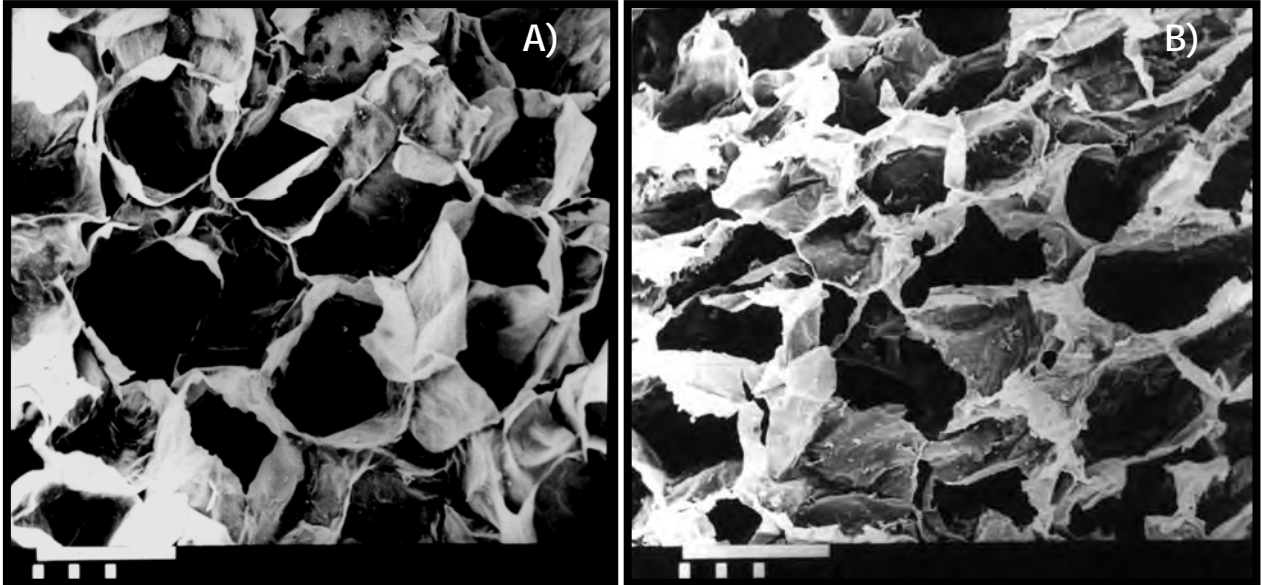


*Figura 28. Carga máxima en función al proceso.*

En la Figura 28 se puede observar como después de cinco horas de proceso la carga necesaria para la penetración del sensor en la muestra sometida al proceso de secado fue de 30% mayor a la buscada como ideal, obteniendo un valor de carga máxima de 0.85 kN. De la misma manera el valor de la muestra tratada mediante deshidratación osmótica no fue igual al de la fruta modelo pero la diferencia en la carga máxima es del 15% menor al ideal. Considerándose esto como una buena mejora con respecto a las carga máximas obtenidas en las corridas de espesor de 1cm del arreglo ortogonal Taguchi.

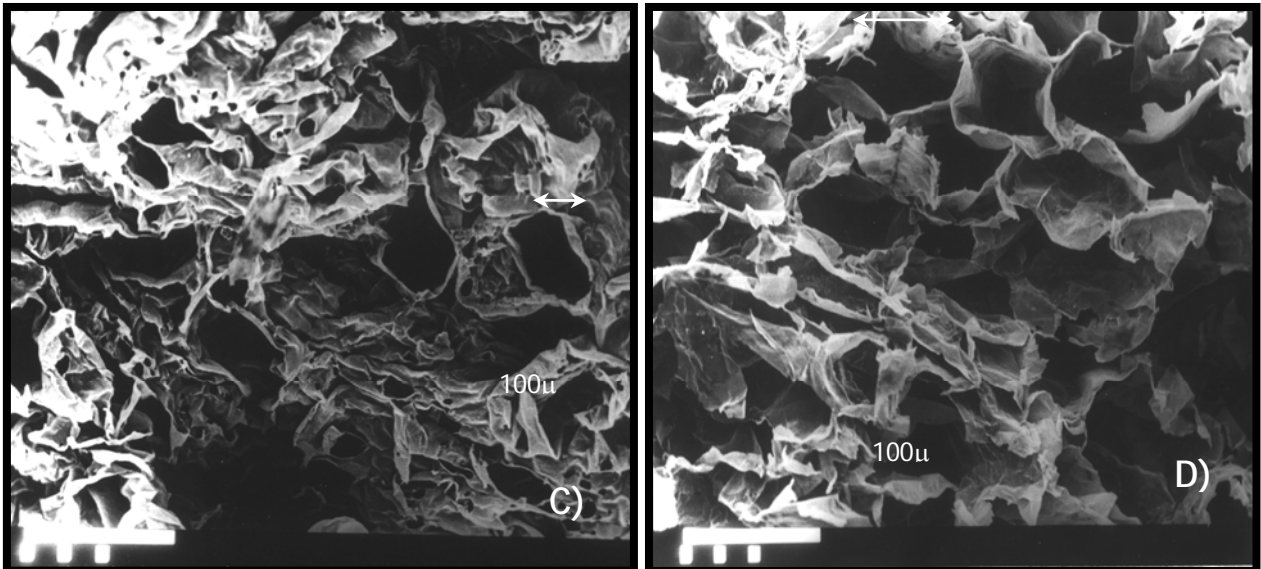
### 3.6.3 Análisis microscópico (MEB)

Por otro lado se realizó el análisis óptico con el MEB de las muestras finales de los dos procesos obteniendo, diferencias visible directas en el producto final atribuidas al tratamiento térmico.



Micrografía (A). Piña fresca.  $H_2O= 96\%$  (200X).

Micrografía (B). Piña después de 5h de deshidratación osmótica (Corrida ideal).  $H_2O= 28\%$  (200X).



Micrografía (C). Piña después de 10h de secado convectivo.  $H_2O= 26\%$  (200X)

Micrografía (D). Piña deshidratada comercial.  $H_2O= 29\%$  (200X)

*Figura 29. Daño estructural en tejidos de piña a diferentes tiempos y diferentes procesos. Tomados en (MEB).*

En la Figura 29 se puede observar diferentes productos de piña a diferentes tiempos de proceso tomadas con el microscopio electrónico de barrido. En ellas se puede apreciar el efecto de los diferentes procesos sobre los tejidos de la fruta.

La Figura 29-A corresponde a una fotografía de piña fresca donde se puede observar el orden y dimensión bien definido que guardan las células, la Figura 29-B es una muestra deshidratada osmóticamente que al compararla con 29-A mantienen todavía cierto orden y dimensión similar al de la fruta fresca, aunque se alcanzan a ver algunos puntos negros ó rupturas de la pared celular las cuales se consideró que son consecuencia del ingreso de los sólidos al interior de la célula.

La Figura 29-C y 29-D corresponden a secado convectivo y muestra deshidratada comercial respectivamente, donde se puede observar el daño celular, mayor en el secado convectivo con un encogimiento excesivamente visible y sin guardar un orden como en las dos fotografías anteriores, lo que refleja la dureza del producto. Por su parte el deshidratado comercial (29-D) sufre un daño menor al del producto secado por convección, pero éste es mayor al que sufrió en el proceso experimental.

## 4. CONCLUSIONES

---

- Al finalizar el presente trabajo se concluye que las variables seleccionadas así como la metodología aplicada fueron las adecuadas ya que se dio cumplimiento al objetivo general del proyecto.
- Las mayores pérdidas de humedad se encontraron en las corridas con concentración alta (60 ° Bx) y espesor menor (1 cm) alcanzando valores por encima de los  $0.798 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{tot}}$  en la corrida ideal.
- Se encontró que la mayor ganancia de sólidos se obtuvo en las corridas que fueron procesadas a temperatura alta (50 °C) que al mismo tiempo contribuye a determinar las propiedades texturales finales del producto, encontrándose los valores menores de carga máxima en las muestras que fueron procesadas a temperatura alta.
- Se observó que el coeficiente de difusión (D) se incrementa en sistemas agitados
- Aunque todas las variables estudiadas tienen un efecto sobre la cinética de deshidratación, en este caso, solo la concentración, el espesor, la temperatura, la agitación, y la solución osmótica, en ese orden, tuvieron un efecto determinante que va de un 48 a un 10 % de influencia por variable ó interacción entre alguna de ellas. La concentración proporciona la fuerza motriz que permite que se realice el fenómeno de la transferencia de masa debido al gradiente de concentración que existe entre el fruto y la solución.
- En esta investigación, durante la deshidratación osmótica la mayor pérdida de agua se consigue en las primeras 2 hrs de proceso.
- La penetración de sólidos en el alimento depende tanto de parámetros del producto (especie, madurez, variedad, etc.) como de los parámetros del proceso (tamaño molecular del soluto, concentración de la solución, temperatura, agitación, etc). Los primeros tienen un efecto significativo en

la estructura natural del tejido, en la estructura de la membrana celular, en la cantidad de sólidos solubles, espacios intercelulares, aire atrapado, etc. Esto hace evidente que la humedad final es un parámetro importante que determina la textura de los productos alimentarios.

- La densidad del tejido es la característica material más importante en las propiedades termofísicas y de transporte; por lo tanto, las diferencias estructurales afectan substancialmente el intercambio másico difusional entre el producto y el medio osmótico.
- La porosidad del material fresco tiene un efecto significativo tanto en los fenómenos de encogimiento como en la velocidad de transferencia de masa.

## 5. RECOMENDACIONES

---

- Con este proceso se puede obtener un producto enchilado el cual logra además bajar el pH del producto final. Para aumentar la duración de estas golosinas también pueden ser empacadas al vacío en recipientes que ofrezcan impermeabilidad al oxígeno y un bajo potencial de oxidación-reducción (Eh) del producto con lo cual se inhibirá el crecimiento de hongos y la producción de *enterotoxinas staphilocóccicas*.
- Se recomienda el desarrollo de una Norma Oficial Mexicana que ayude a controlar la producción, almacenaje y distribución de este tipo de productos, así como los productos cristalizados, lo cual permita prolongar la vida útil de este tipo de golosina.
- En el proceso de deshidratación osmótica la fruta sufre una serie de pérdidas de agua y otros compuestos los cuales van a diluirse en el jarabe. Estos compuestos contribuyen a comunicar al jarabe el color, aroma y sabor genuino de la fruta los cuales son atrapados y estabilizados por los compuestos concentrados, por lo que este jarabe puede servir posteriormente para endulzar jugos, mermeladas, jaleas o cualquier otro derivado de las frutas, siendo principalmente efectivo en productos lácteos.

## ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS

---

Para fines de estandarización de términos, en este trabajo de investigación se entiende por:

Ángstrom: Unidad de medida igual a  $10^{-6}$  m

Deshidratación: Separación de agua de una molécula por la acción de un agente deshidratante (no necesariamente requiere el aumento de temperatura por encima de la temperatura del sistema)

Flavor: Combinación de aroma y sabor que confiere un gusto específico a un producto

Inmiscibilidad: La propiedad que poseen dos o más líquidos de no mezclarse uno con otro y de formar más de una fase cuando se ponen en contacto.

Jarabe: Es una mezcla líquida de un soluto y un disolvente la cual se encuentra en una relación no menor a 1:1 (W/W). Para que una solución pueda ser considerada como un jarabe su contenido de sólidos solubles deberá ser mayor al 30%.

Miscibilidad: Propiedad que permite a dos o más líquidos mezclarse cuando se ponen en contacto y formar así una sola fase.

Presión crítica: Es la presión a la que un gas se licua a su temperatura crítica (temperatura por encima de la cual no puede licuarse un determinado gas).

Presión Osmótica: Es la presión ejercida por una sustancia disuelta en virtud del movimiento de sus moléculas.

Presión de vapor: La parte de la presión atmosférica que confiere al vapor de agua contenido en el sistema.

Ruido: variabilidad de datos experimentales

Secado: Extracción de agua de un material por la acción de corrientes de aire caliente.

Sistema: Toda porción de una materia que se haya aislada de las otras sustancias, en realidad o imaginariamente.

Solución: Mezcla íntima y de composición variable entre dos o más sustancias, una de las cuales suele ser un líquido, y que pueden separarse por medios físicos sencillos.

Soluto: Sustancia que se encuentra disuelta en otra.

Viscosidad: Fricción interna debida a la cohesión molecular de los fluidos. j

Staphylococo aureus: Es un coco gram positivo miembro del género de los Estaphylococos, es el más común de la especie; crece muy bien bajo condiciones de alta presión osmótica y baja humedad. El S. aureus produce una toxina responsable del síndrome de choque tóxico y algunas infecciones (alta temperatura, vómito y a veces muerte), su entera toxina cuando es ingerida causa náusea y vómito de la misma manera que la toxina del cólera. Esta es la más común de las causas de envenenamiento por alimentos. (Tortora, 1997)



## ANEXO 2. NOMENCLATURA.

---

DO	Deshidratación osmótica
Aw	Actividad de agua
MO	Microscopio óptico
MEB	Microscopio electrónico de barrido
HF	Humedad final [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
% S <sub>s</sub>	% de sólidos solubles
% S <sub>ref</sub>	Lectura de % de sólidos en el refractómetro
Å	Angstrom = 1x10 <sup>-10</sup> m
W	Contenido de humedad [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
SG	Ganancia de sólidos [g <sub>sol</sub> /g <sub>H2O</sub> ]
W <sub>i</sub>	Peso inicial del alimento [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
W <sub>f</sub>	Peso final del alimento [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
WS <sub>t</sub>	Peso de los sólidos finales [g <sub>sol</sub> /g <sub>H2O</sub> ]
WW <sub>o</sub>	Peso del agua inicial [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
WS <sub>o</sub>	Peso de sólidos iniciales [g <sub>sol</sub> /g <sub>H2O</sub> ]
WL	Pérdida de humedad [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
W <sub>t</sub>	Peso de la muestra [g <sub>H2O</sub> /g <sub>tot</sub> ]
D <sub>AB</sub>	Coefficiente de difusión de un compuesto A en solución B [s/m <sup>2</sup> ]

$J_{AB}$	Flux difusivo de un compuesto A en solución B [ $\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ]
$N_A$	Flux total de transferencia de masa [ $\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ]
$W_A$	Cantidad de soluto que se disuelve por unidad de tiempo [ $\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{s}$ ]
$K$	Constante de proporcionalidad denominada coeficiente de transferencia
$dC_A$	Diferencia de concentración entre dos puntos [ $\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^3$ ]
$\Delta A$	Decremento en la concentración [ $\text{kg}\cdot\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^3$ ]
TTP	Transporte transmembranario plasmalemmático
TTS	Transporte transmembranario simplástico
TDC	Transporte difusional convectivo
$^{\circ}\text{Bx}$	Grados Brix
$^{\circ}\text{C}$	grados Celsius
RPM	Revoluciones por minuto
TPA	Análisis de perfil de textura
$t$	Tiempo [h, min,s]
$\sigma$	Esfuerzo
$\epsilon$	Deformación
$L_0^2 h_0$	Area ajustada
Dh	Cambio relativo en la altura [m]
$F_M$	Fuerza máxima requerida
$A_T$	Area transversal

KN

Kilo Newton

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Adrian, J. (1990). "La ciencia de los alimentos de la A a la Z". Ed. Acribia. España. 317 pp.
- Anzaldua, A. (1994). "La evaluación sensorial de los alimentos; teoría y practica". Ed. Acribia. España. 198 pp.
- Arthey, D. (1996). "Procesado de frutas". Ed. Acribia. España, 273 pp.
- Badui, S. (1981). "Química de los Alimentos". Ed. Alhabra Mexicana. México. 648 pp
- Barbosa, V. (2000). "Deshidratación de alimentos". Ed. Acribia. España. 279 pp.
- Barker, B. (1990). "Engeenering quality by design". Ed. Marcel Dekker, Inc. USA. 249 pp.
- Bird, R. (1995). "Fenómenos de transporte; un estudio sistemático de los fundamentos de materia, energía y cantidad de movimiento". Ed. Reverte. España-México. 120 pp.
- Bourne, M. (1982). "Food texture and viscosity; concept and measurement". Ed. Academic Press. EUA. 325 pp.
- Campillo, H. (1991). "Enciclopédico universo, diccionario en lengua española". Ed. Fernández editores. México. 1200 pp.
- Collocott, T. (1979). "Diccionario científico y tecnológico; Chambers". Ed. Omega. España. 1739 pp.
- Crank, J. (1975). "The mathematics of difussion". Ed. Oxford university press. UK. pp
- Cussler, E. (1984). "Difusión; mass transfer in fluid systems". Ed. Cambridge University Press. EUA. 525 pp.

- FAO. (1993). "Prevención de pérdidas de alimentos poscosecha; Manual de capacitación". Colección FAO 17/2. 183 pp.
- Fisher, C. (2000). "Flavores de los alimentos". Ed. Acribia. España. 212 pp.
- Geankoplis, C. (1998). "procesos de transporte y operaciones unitarias". 3ª edición. Ed. CECSA. México. 1006 pp.
- González, S. (2003). "Guía de microscopía electrónica". UNAM. FESC. 67pp.
- Hines, A. and Maddox R. (1985). "Mass transfer; fundamentals and applications". Ed. Prentice Hall. EUA. 541 pp.
- Lobo, R. (1997). "Principios de transferencia de masa". Ed. UAM. México. 533 pp.
- Mafart, P. (1994). "Ingeniería Industrial Alimentaria". vol. 1. Ed. Acribia. España. 281 pp.
- Montgomery, D. (1991) Control estadístico de la calidad. Ed. Iberoamericana. México. 477pp.
- Mitchell, R. (1988). "Food structure its creation and evaluation". Ed. M. V. Blanshard, London. 504 pp.
- Rosenthal, A. (2001). "Textura de los alimentos; medida y percepción". Ed. Acribia. España. 299 pp.
- Romero, F. (1996). "Nuevas tecnologías de conservación de frutas y hortalizas". Ed. Ediciones Mundi-Prensa. México. 221 pp.
- Saderra, J. (1993). "El secreto de la calidad Japonesa". Ed. Marcombo. Barcelona. 174 pp.
- Senser, F. (1999). "Tablas de composición de alimentos". 2ª Edición. Ed. Acribia. España. 430 pp.

- SEP. (1983). "Fruticultura". Ed. Trillas. México. 106 pp.
- Sharman, S. (2003). "Ingeniería de alimentos, operaciones unitarias y prácticas de laboratorio". Ed. Limusa Wiley. México. 348 pp.
- Shouthgate, D (1989). "Conservación de frutas y hortalizas". 3ª. Ed. Acribia S.A. Zaragoza España. 216 pp
- Soroa, (1965). "Industria transformadora de frutas y hortalizas". Ed. Dossat. España. 303 pp.
- Tortora, G. (1997). "Microbiology: an introduction". 6ª edición. Ed. Benjamin Cummings. EUA. 832 pp.
- Treybal, R. (1988). "Operaciones de transferencia de masa". 2ª edición. Ed. McGraw Hill. EUA. 858 pp.
- Vazquéz, G. (2000). "Introducción a la microscopía electrónica aplicada a las ciencias biológicas". Facultad de ciencias. UNAM. Fondo de cultura económica. 160 pp.
- Wills R.; Lee T.; Mcclason, Hall W.; Graham D.. (1989). "Fisiología y manipulación de frutas y hortalizas post-recolección". Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Amami E, Vorobiev E, Kechaou N. "Modelling of mass transfer during dehydration of apple tissue pre-treated by pulsed electric field" *Food science and technology* . Ed. Elsevier. (39): 1014 - 1021 (2006).
- Chiralt A. And Fito P. "Transport mechanisms in osmotic dehydration the role of the structure". *Food science and technology international*. Ed. Sage Publications. 9 (3): 179-186 (2003).

- Contreras, M. et. al. "Estudio cinético de la transferencia de masa en la deshidratación osmótica a vacío por pulsos en kiwi utilizando mosto de uva". *Industria alimentaria*. Ed. Alfa editores técnicos S.A. de C.V. España - Chile - México. 20, (5): 18 - 22. (1998).
- Kaymak-Ertekin Figen, Sultanoglu Mustafa. "Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apple". *Journal of Food Engineering*. Ed. Elsevier. 46: 243 - 250 (2000).
- Lazarides Harris N., Gekas Vassilis and Mavroudis Nikolaos. "Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing". *Journal of food engineering*. Ed. Elsevier. 31: 315 - 324. (1997)
- Maguer, M Le, Shi J. and Fernandez C. "Mass transfer behavior of plant tissues during osmotic dehydration". *Food science and technology international*. Ed. Sage Publications. 0187,(6): 187 - 192 (2003).
- Moreira Ramón y Sereno Alberto M. "Evaluation of transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solution in static and non-static conditions". *Journal of Food Engineering*. Ed. Elsevier. 57: 25-31 (2003).
- Mújica-Paz H, Valdez-Fragoso A, López\_Malo A. L., Palou E. and Welti-Chanes J. "Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration" *Journal of food Engineering*. Ed. Elsevier. 57: 305-314 (2003).
- Nieto A.B., Salvatori D.M., Castro M.A. and Alzamora S.M. "Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features". *Journal of Food Engineering*. Ed Elsevier. 61: 269-278 (2004)

- Rastogi N. K., Raghavarao K.S.M.S. and Niranjana K. "Mass transfer during dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration". *Journal of Food Engineering*. Ed Elsevier. 37: 43 - 47. (2002)
- Rastogi N.K, Raghavarao K.S M .S, Niranjana K. And Knorr D. "Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer". *Food science and Technology*. Ed. Elsevier. 13, (2): 48 - 59 (2004).
- Shi J. and Maguer M. L. "Mass transfer flux at solid-liquid contacting interface". *Food science and technology international*. Ed. Sage Publications. 193,(7): 193 - 199. (2003).
- Shyam S. Sablani, M. Shafiur Rahman and Dawood S. Al-Sadeiri."Equilibrium distribution data for osmotic drying of apple cubes in sugar - water solution". *Journal of food engineering*. Ed. Elsevier. 52: 193 - 199 (2002).
- Spiazzi Edgardo A y Mascheroni Rodolfo H. "Modelo de deshidratación osmótica de alimentos vegetales". MAT - Serie A, 4: 23-32 (2001).
- Carrera, P. "Estudio del transporte simultáneo de calor y masa en el secador por aspersión". Tesis (Ingeniería en alimentos). Estado de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México.1994. 110 pp.
- Chavarria. S. y Velásquez S. R. "Estudio del proceso de deshidratación osmótica de fresa (*Fragaria vesca*)". Tesis (Ingeniería en alimentos). 1997.90 p.
- Revisita online. Mundo alimentario. Deshidratación osmótica de frutas. 2004. Julio -Agosto. 3 - 9 pp. Disponible en: <[http://www.alimentariaonline.com/apadmin/img/upload/MA001\\_DESOSWF.pdf](http://www.alimentariaonline.com/apadmin/img/upload/MA001_DESOSWF.pdf)>.
  - Instituto Nacional de Geografía e Informática. Producción de piña y manzana en México (2006).Consulta 2007. Disponible en: <<http://www.inegi.gob.mx/agronomia/2006>>



- Universidad Autónoma de Chapingo. Programa Nacional de Investigación y Servicio en Economía Agrícola. Consulta. 2003. En línea. Disponible en:

<<http://www.chapingo.mx/investigacion/pronisea/.html>>

- <<http://www.cideiber.com/infopaises/Mexico/Mexico-04-01.html>>

- Importancia de las frutas:

<<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/71180/teoria/obfrudes/p1.htm>>

(Diciembre del 2003)

- Conservación de alimentos:

<<http://www.cookaround.com/cocina/storia/conservazione.php>>

(Diciembre 2003)

- Historia de la conservación de alimentos:

<[http://www.judaismovirtual.com/v.conservar\\_alimentos.htm](http://www.judaismovirtual.com/v.conservar_alimentos.htm)>

(Diciembre 2003)

- Características de las frutas:

<<http://www.agroinfo.com>>

(Octubre 2004)