



**Universidad Nacional de La Plata**

**Estudio teórico y validación experimental de la  
dehidrocongelación de ananá**

**Laura Ana Ramallo**

Tesis presentada ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional  
de la Plata como requisito parcial para la obtención del grado académico de

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química  
Fecha de la defensa oral y pública: 30 de abril de 2010

**La Plata, 2010**



**Universidad Nacional de La Plata**

**Estudio teórico y validación experimental de la  
dehidrocongelación de ananá**

**Laura Ana Ramallo**

**Dirección de tesis: Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni**

**La Plata, 2010**

**Esta Tesis Doctoral es parte de los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, para obtener el título de Doctor en Ingeniería.**

**El presente trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni. El trabajo experimental se llevó a cabo en varias etapas, utilizando equipamiento disponible en el Centro de Investigación y desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA), UNLP; en la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la UNAM, y en los laboratorios del Departamento de Ingeniería de los Alimentos de la UNICAMP (Brasil).**

## **Agradecimientos**

A las Instituciones que facilitaron el ámbito para el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Rodolfo Mascheroni por la confianza mostrada en el desarrollo de este estudio, su generosa asistencia intelectual y su invaluable apoyo humano.

A la Dra. Myriam Hubinger, por facilitar mi estancia en Campinas y por su cordial asistencia técnica.

Especialmente a mi familia, por acompañarme.

**A Daniela y Sebastián, mis hijos.**

Parte de los resultados obtenidos en esta tesis fueron publicados en los siguientes trabajos:

- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2010. Dehydrofreezing of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 99(3): 269-275.
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2009. Retención del ácido ascórbico en ananá durante la deshidratación osmótica y el secado. Actas del *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP)*, San Rafael, Mendoza.
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2009. Cinética de rehidratación de ananá pre-secado con aire caliente. Actas del *Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP)*, San Rafael, Mendoza.
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2009. Efecto de la congelación sobre la calidad de ananá osmo-deshidratado. Actas del *III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, Córdoba, Argentina.
- Ramallo, L.A.; Hubinger, M.; Mascheroni, R.H. 2007. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de ananá con pulsos de vacío. Actas del *XI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología (CYTAL)*, Buenos Aires, Argentina.
- Ramallo, L.A.; Hubinger, M.; Mascheroni, R.H. 2007. Influencia de las condiciones del proceso osmótico sobre las propiedades mecánicas del ananá. Actas del *XI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología (CYTAL)*, Buenos Aires, Argentina
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2005. Cambios de color, volumen y vitamina C durante el secado de ananá. Actas del *X Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología (CYTAL)*, Mar del Plata, Argentina
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2005. Rate of water loss and sugar uptake during the osmotic dehydration of pineapple. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48 (5): 761-770.

- Ramallo, L.A.; Schvezov, C.; Mascheroni, R.H. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple. *Food Science and Technology International*, **10**: 323-332.
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2004. Prediction and determination of ascorbic acid content during pineapple drying. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil.
- Ramallo, L.A.; Mascheroni, R.H. 2001. Water loss and sugar migration during the osmotic dehydration of pineapple. *Proceeding of ENPROMER (3<sup>rd</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering - 1<sup>st</sup> Mercosur Congress on Chemical Engineering)*, Santa Fe, Argentina, Vol. III, 1675:1680.
- Ramallo, L.A.; Schvezov, C., Mascheroni, R.H. 2001. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of pineapple. *Proceeding of ENPROMER (3<sup>rd</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering - 1<sup>st</sup> Mercosur Congress on Chemical Engineering)*, Santa Fe, Argentina, Vol. III, 1675:1680.

**Índice**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>I</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>I</b>
<b>Objetivos generales</b>	<b>iii</b>
<b>Objetivos específicos</b>	<b>iii</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
<b>1. Generalidades</b>	<b>1</b>
1.1 Origen y caracterización de la especie	1
1.2 Morfología y Taxonomía	3
1.3 Características del fruto de ananá	5
1.3.1 Composición química y valor nutricional	6
1.4 Producción	8
1.4.1 Situación actual y perspectivas	8
1.4.2 Situación de la Provincia de Misiones	9
1.5 Productos derivados del ananá	9
<b>2. Secado</b>	<b>14</b>
2.1 El proceso de secado	14
2.2 Etapas de la curva de secado	17
2.3 Modelos existentes en secado de frutas	20
2.4 Encogimiento del material durante el secado	22
<b>3. Deshidratación osmótica</b>	<b>25</b>
3.1 El proceso de deshidratación osmótica	25
3.2 Ventajas y desventajas de la ósmosis.	27
3.3 Variables del proceso:	28
3.4 Modelos matemáticos que describen el proceso de deshidratación osmótica	34
3.5 Limitaciones de la Deshidratación osmótica	40
<b>4. CONGELACION.</b>	<b>41</b>
4.1 Fundamentos de congelación	41
4.2 Aspectos físicos de la congelación	44
4.3 Aspectos bioquímicos de la congelación de productos de origen vegetal	45
4.4 Métodos de congelación	47
4.5 Dehidrocongelación	48
<b>5. Parámetros de calidad durante la deshidratación de vegetales</b>	<b>52</b>
5.1 Introducción	52
5.2 Propiedades estructurales	55
5.3 Propiedades ópticas (color)	56
5.4 Propiedades texturales o propiedades mecánicas (compresión)	62
5.5 Propiedades de rehidratación	65

---

5.6 Características nutricionales	68
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>71</b>
<b>SECADO</b>	
<b>Resumen</b>	<b>81</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>82</b>
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>84</b>
2.1 Preparación de la muestra	84
2.2 Procedimiento de secado	85
2.3 Consideraciones teóricas del proceso de secado.	86
2.3.2 Segunda Ley de Fick: difusión a través de sólidos porosos	86
2.3.2 Modelo 2: espesor variable con el contenido de agua del vegetal	89
2.4 Variación del volumen	92
2.3 Determinación del contenido de agua	93
2.4 Degradación del ácido ascórbico	94
2.4.1 Cuantificación de ácido ascórbico	94
2.4.2 Simulación de la degradación del ácido ascórbico durante el secado a 45 °C	94
2.5 Cambios del color	98
2.5.1 Medidas instrumentales del Color	98
2.5.2 Parámetros de color seleccionados para analizar cambios durante el secado	98
2.6 Propiedades mecánicas	99
2.7 Rehidratación	99
2.7.1 Metodología experimental	99
2.7.2 Metodología de cálculo	100
<b>3. Resultados experimentales</b>	<b>102</b>
3.1 Variación del volumen	102
3.2 Cinética de secado	104
3.2.1 Velocidad de secado	104
3.2.2 Modelos de difusión de humedad	107
3.3 Variación del color	111
3.3.1 Cambios en las medidas de los atributos del color a y b	111
3.2.2 Cambios en la medida del color L	113
3.2.3 Hue y Chroma	114
3.3 Contenido de ácido L-ascórbico	116
3.3.1 Resultados experimentales	116
3.3.2 Predicción del contenido de ácido ascórbico durante el secado	118
3.4 Propiedades mecánicas	120
3.5 Rehidratación	122
<b>4. Conclusiones</b>	<b>126</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>127</b>
<b>DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA</b>	
<b>Resumen</b>	<b>132</b>

<b>1. Introducción</b>	<b>133</b>
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>138</b>
2.1 Preparación de la muestra	138
2.2 Condiciones de deshidratación osmótica	138
2.3 Estudio del perfil de concentraciones	139
2.4 Consideraciones teóricas de la transferencia de masa	140
2.4.1 Modelo sencillo de transferencia de masa basado en la Segunda Ley de Fick	140
2.5 Variación del volumen durante la deshidratación	143
2.6 Determinación de humedad, acidez, pH y sólidos solubles	144
2.7 Cuantificación de ácido ascórbico	144
2.8 Determinación del contenido de azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa)	145
2.9 Hidrólisis de sacarosa durante la deshidratación osmótica del ananá	145
2.10 Propiedades mecánicas	146
2.11 Evaluación instrumental del color	147
2.12 Rehidratación	148
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>148</b>
3.1 Caracterización de la fruta fresca	148
3.2 Observaciones al microscopio	149
3.3 Transferencia de masa	152
3.3.1 Resultados experimentales de pérdida de humedad	152
3.3.2 Resultados experimentales de ganancia de sacarosa	155
3.3.3 Contenido de agua y de sacarosa en el equilibrio	159
3.4 Variación del espesor	160
3.5 Coeficientes de difusión del agua y de la sacarosa	162
3.6 Índice de Eficiencia del proceso de deshidratación osmótica	164
3.7 Relación entre el contenido de agua y de sacarosa durante el proceso	164
3.8 Contenido de ácido L-ascórbico	167
3.8.1 Variación del contenido de ácido L-ascórbico en la fruta fresca	167
3.8.2 Variación del ácido L-ascórbico durante la deshidratación osmótica	169
3.9 Concentración de glucosa y fructosa durante la deshidratación osmótica	171
3.10 Hidrólisis de sacarosa durante la deshidratación osmótica del ananá	174
3.11 Perfil de concentración de humedad, sacarosa, fructosa y glucosa	176
3.12 Sólidos solubles, pH y acidez titulable	178
3.13 Color	179
3.14 Propiedades mecánicas	183
3.15 Rehidratación	186
<b>4. Conclusiones</b>	<b>192</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>194</b>
 <b>DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA CON PULSOS DE VACÍO</b>	
<b>Resumen</b>	<b>201</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>202</b>
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>204</b>
2.1 Preparación de la muestra	204
2.2 Determinación de humedad, acidez, pH y sólidos solubles	204
2.3 Condiciones de deshidratación osmótica	204

2.4 Transferencia de masa. Procedimiento de cálculo	206
2.5 Modelo de transferencia de masa	206
2.6 Evaluación de la textura	207
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>207</b>
3.1 Transferencia de masa	207
3.2 Relación entre las condiciones de operación y la optimización del proceso	212
3.3 Variación del espesor	214
3.4 Coeficientes de difusión	216
3.5 Propiedades mecánicas	218
<b>4. Conclusiones</b>	<b>223</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>224</b>
<b>DEHIDROCONGELACIÓN</b>	
<b>Resumen</b>	<b>227</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>228</b>
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>231</b>
2.1 Metodología experimental	231
2.1.1 Preparación de la muestra	231
2.1.2 Deshidratación osmótica	231
2.1.3 Secado con aire caliente	232
2.1.4 Tratamiento de congelación-descongelación	232
2.1.5 Evaluación de la textura	232
2.1.6 Medidas de exudado	233
2.1.7 Variación del contenido de vitamina C en el proceso congelación-descongelación	233
2.2 Consideraciones teóricas	233
2.2.1 Modelo de transferencia de calor aplicado a la congelación	233
2.2.2 Ecuaciones de predicción de las propiedades de la fruta	235
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>237</b>
3.1 Historia térmica durante la congelación. Resultados experimentales.	237
3.2 Evolución de la temperatura durante la congelación. Predicciones del modelo aplicado.	241
3.3 Cambio en las propiedades mecánicas	245
3.4 Pérdidas de agua por exudado	248
3.5 Pérdidas de vitaminas	252
3.5.1 Efecto del secado con aire-congelación-descongelación	252
3.5.2 Efecto de la deshidratación osmótica-congelación-descongelación	254
3.5.3 Comparación del efecto de la DO y el secado sobre la pérdida de Vitamina C	255
<b>4. Conclusiones</b>	<b>257</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>258</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>218</b>

## **Introducción**

Tradicionalmente la provincia de Misiones ha sido la principal región productora de ananá en el país y proveedora de aproximadamente el 30% del total de ananá fresco destinado al consumo interno en Argentina, el restante proviene del exterior, principalmente de Brasil. La producción de esta fruta experimenta hoy un resurgimiento impulsado por el tipo de cambio y un mercado fuertemente demandante. No obstante, las cadenas de comercialización no son eficientes y se tienen importantes pérdidas en los períodos pico de producción. Debido a que el clima de nuestra región (alta humedad y temperatura) incide desfavorablemente en su conservación, sería de gran beneficio disponer de técnicas de preservación de ananá, que sean económica y tecnológicamente viables, y que garanticen la calidad del producto.

Existen numerosos estudios de mercado que indican la preferencia del consumidor por frutas mínimamente procesadas, que conserven en gran medida sus características originales. El mercado de los alimentos congelados ha ido en aumento debido principalmente a la evolución y disponibilidad tecnológica. Sin embargo, pocas frutas y verduras pueden comercializarse congeladas debido a los cambios generados en la estructura del tejido vegetal durante la congelación-descongelación (cambios que se deben principalmente al alto contenido de agua de los vegetales).

Una deshidratación parcial previa a la congelación es, en muchos casos, una solución a este problema, mejorando la calidad y textura del producto congelado. Esta deshidratación

parcial puede efectuarse mediante el secado tradicional con aire caliente o por deshidratación osmótica.

En los últimos años se ha incrementado el interés, tanto gubernamental como popular, por los productos alimenticios cuyo origen esté relacionado con la protección al medio ambiente, sin descuidar la calidad en todos sus aspectos. Varias investigaciones han demostrado que la deshidratación osmótica permite obtener, con bajo consumo energético, productos de excelente calidad que mantienen elevada similitud organoléptica con la fruta fresca, condición esencial para la aceptación de los consumidores.

Dentro de este marco se debe remarcar que una disminución en el contenido de agua de la fruta significa una disminución en la cantidad de agua a ser congelada, posibilitando de esta manera una reducción en la carga frigorífica necesaria para lograr el congelamiento del producto. En consecuencia, las frutas parcialmente deshidratadas implican menor gasto energético de congelamiento, distribución y almacenamiento, respecto de las frutas frescas.

## **Objetivos**

## **Objetivos generales**

El presente trabajo de tesis pretende estudiar la aplicación de dos procesos tradicionalmente utilizados para deshidratar frutas y hortalizas, secado con aire caliente y deshidratación osmótica, con el objetivo de disminuir el contenido de agua en ananás previo a una posterior etapa de congelación. Asimismo, se evaluará el efecto del proceso de congelación-descongelación sobre la calidad final de la fruta fresca y parcialmente deshidratada.

El estudio se enfocará desde dos puntos de vista:

- a través de la eficiencia del proceso, para lo cual se evaluará el efecto de las variables de operación (o algunas de ellas) sobre la cinética de pérdida de agua
- a través de la calidad del producto obtenido, para lo cual se valorarán los cambios generados por las diferentes condiciones de operación sobre las propiedades nutricionales y las características ópticas y mecánicas

## **Objetivos específicos**

Para concretar estos objetivos generales se siguieron los siguientes objetivos particulares:

Los objetivos del estudio de secado de ananá fueron:

- cuantificar y analizar cambios en el color, las propiedades mecánicas y el contenido de vitamina C durante el secado convectivo de medias rodajas de ananá a diferentes temperaturas

- **determinar la relación entre la pérdida de volumen de la fruta y el contenido de agua de la misma durante el secado**
- **incorporar la variación de volumen observada en la fruta en el modelo difusional de transferencia de masa y validar dicho modelo a través de los resultados experimentales**
- **desarrollar un modelo de predicción de la retención de vitamina C en condiciones dinámicas, y validarlo con los datos experimentales obtenidos durante el secado de ananá con aire caliente**
- **analizar el efecto de las condiciones del secado sobre las propiedades de rehidratación del producto y plantear un modelo sencillo para describir la ganancia de agua durante este proceso**
- **finalmente, y en base a los resultados logrados, definir las condiciones de secado apropiadas para preservar la calidad del producto**

Los objetivos del estudio de deshidratación osmótica de ananá fueron:

- **cuantificar y analizar cambios en el color, propiedades mecánicas y contenido de vitamina C durante la deshidratación osmótica en solución de sacarosa de medias rodajas de ananá, y evaluar la influencia de la temperatura del proceso sobre la magnitud de los cambios**
- **determinar la relación entre el encogimiento de la fruta y el contenido de agua de la misma durante el proceso**
- **aplicar un modelo difusional de transferencia de masa en el cual la variación de volumen observada sea tenida en consideración**
- **medir el perfil de humedad y de sacarosa generado durante el proceso osmótico**
- **valorar la retención de vitamina C durante la deshidratación de ananá y analizar el efecto de la temperatura de operación sobre la degradación del nutriente**
- **cuantificar la pérdida de otras sustancias presentes en la fruta, glucosa y fructosa, durante el proceso de deshidratación**
- **analizar el efecto de la temperatura de deshidratación sobre las propiedades de rehidratación del producto y aplicar un modelo sencillo para describir la ganancia de agua durante este proceso**

- en base a los resultados logrados, definir la temperatura de deshidratación óptima para preservar la calidad nutricional del producto al mismo tiempo de lograr una velocidad de deshidratación apropiada
- analizar el efecto de la aplicación de pulsos de vacío durante el proceso osmótico a la temperatura óptima, evaluando la cinética de pérdida de agua y de ganancia de sacarosa, como así también el encogimiento y las propiedades mecánicas de la fruta.

Los objetivos del estudio de dehidrocongelación de ananá fueron:

- analizar la influencia de diferentes niveles de deshidratación, osmótica y mediante aire caliente, sobre la velocidad de congelación
- evaluar la pérdida de agua por exudado y la propiedades mecánicas de la fruta después del proceso de congelación-descongelación, para fruta con diferentes grados de deshidratación
- analizar el efecto del proceso de congelación lento (la condición más desfavorable) sobre el contenido de ácido ascórbico, en muestras de fruta con diferentes tiempos de deshidratación osmótica previa y en muestras de ananá previamente secadas con aire caliente durante diferentes tiempos
- aplicar un modelo de transferencia de calor desarrollado para otro sistema alimenticio para evaluar los tiempos de congelación de las muestras y cotejarlos con los resultados experimentales obtenidos. Las propiedades termofísicas necesarias para la simulación se evaluarán mediante modelos propuestos en la literatura específica.

# **Capítulo I**

.

## **Antecedentes**

## **1. Generalidades**

### **1.1 Origen y caracterización de la especie**

Nombre común: ananá, piña, pineapple

Nombre científico: *Ananas comosus*

#### Explicación del nombre científico:

*Ananas* - modificación del original nombre aborigen sudamericano de la planta, *nana*, que significa fragancia

*comosus* - con cabello largo, en referencia a la silueta de la planta.

Cuando Cristóbal Colón, en 1493, llevó por primera vez frutas de ananá a España, las llamaron “Pino de las Indias” ya que su aspecto les recordaba la fruta del pino. En Inglaterra las llamaron “apple” debido al sabor de la fruta. De aquí que el nombre “Pineapple” surge de la combinación del español “piña” con el inglés “apple”.

El ananá, única bromelia de fruta comestible, es casi exclusivamente del Nuevo Mundo, con aproximadamente 2000 especies. Todas estas especies son nativas de la cuenca amazónica. Se han señalado como el área de origen la cuenca superior del Paraná, entre Brasil, Paraguay y Argentina, las selvas del curso superior del Amazonas, y las regiones semisecas de Brasil, Venezuela y Guyanas (Py, 1969). Una especie adicional es de África.

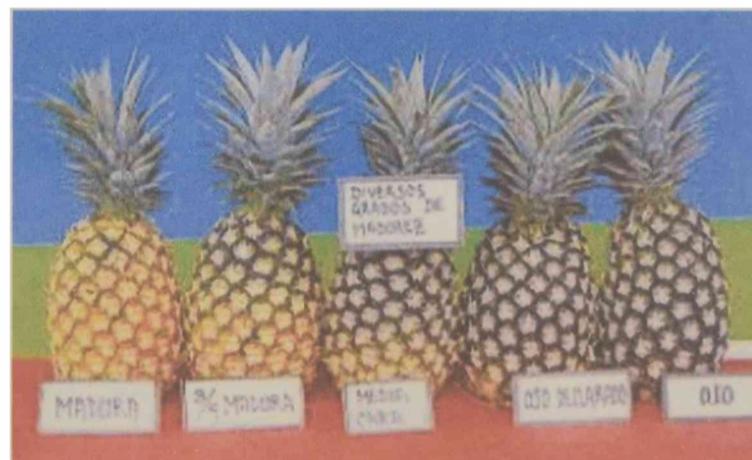
Sin embargo, en la actualidad esta fruta puede ser encontrada en todas las regiones tropicales. En el siglo XVI los exploradores portugueses la llevaron por el mundo entero. Existen registros de que los chinos la cultivaban por el año 1640, pero sólo fue introducida a Hawai en 1813. Hawai comenzó a exportar piñas enlatadas en 1892 y James Dole, quien estableció la Hawaiian Pineapple Company, comenzó su plantación allí en 1900.

En contraste con las demás bromelias, el ananá es una planta terrestre. Las regiones de producción de piña por lo general están limitadas a altitudes debajo de 800 m por encima del nivel de mar, aunque Kenia tiene campos de producción localizados entre 1400 y 1800 m, y en Malasia se encuentran huertos a alturas de 2400 m.

Ha sido sugerido que las condiciones óptimas de crecimiento óptima son temperatura media anual de 25-32 °C, régimen de precipitaciones regular (entre 1000-1500 mm) y elevada

humedad ambiental (Leal, 1995; Infoagro, 2002). Cuando la temperatura ambiental es inferior a 10-16 °C, la fruta presenta un limitado crecimiento. Las plantas pueden soportar temperaturas sub-congelantes durante períodos muy cortos. A la inversa, la exposición a temperaturas mayores que 30°C puede producir daño por calor, debido al incremento en la velocidad de respiración y metabolismo, lo que perjudica la absorción de nutrientes.

Basado en un gran número de trabajos realizados en el Instituto de Hawaii, se propuso una terminología para el desarrollo, maduración, estado óptimo y senescencia de la piña. Los principios para esta propuesta están basados en los cambios físicos y bioquímicos que ocurren durante la reproducción y desarrollo del fruto. Hay un lapso de 110-160 días entre el final de la florecencia y el logro del estado óptimo de desarrollo del tamaño y sabor del ananá, dependiendo de la región de cultivo (Singleton, 1965). Los cambios en la composición química ocurren cuando la mitad de la cáscara de la fruta se manifiesta de color amarillo.



**Figura I.1.** Etapas de maduración del ananá (FAO, 2003)

La clorofila, carotenos, xantofilas y antocianinas son los principales pigmentos encontrados en la piña. La presencia de ellos varía el color externo de la fruta desde verde, verde amarillo y amarillo hasta una mezcla de amarillo o violeta con o sin color verde. El color externo de la piña es un factor importante en la preferencia del consumidor. Durante la maduración de la fruta desaparece la clorofila y se incrementa el contenido de carotenos totales y carotenos en la pulpa, mientras que disminuyen los carotenos de la cáscara. Tanto los carotenos de la cáscara como los de la pulpa aumentan durante la senescencia (Marchal

& Soler, 1991). Estos puntos permiten la delineación de distintas etapas en el desarrollo de la fruta como se muestra en la Figura 1.1.

El cambio en la maduración se expresa cuando el color de la cáscara cambia del verde al amarillo en la base de la fruta. Las piñas son frutas no climatéricas por lo que se les debe cosechar cuando están listas para consumirse. El color de la cáscara es el factor determinante para escoger el punto de corte, sin embargo, debe tenerse en cuenta que el color de la fruta varía de acuerdo al tamaño de la misma, mientras más grande sea ésta, con menor intensidad se colorea la cáscara.

## 1.2 Morfología y Taxonomía

De acuerdo a Py (1969) la ubicación taxonómica del ananá es:

Categoría	Grupo
Reino	Vegetal
Phyllum	Pteridófita
Clase	Angiosperma
Subclase	Monocotiledonea
Orden	Farinosae
Familia	Bromeliaceae
Género	<i>Ananas</i>
Especie	<i>comosus</i>

El origen de diferentes variedades de ananá se puede atribuir a mutaciones somáticas. Ya que no hay auto-polinización y la polinización cruzada ocurre sólo de vez en cuando, los híbridos naturales son raros. Además, las semillas no germinan fácilmente. Actualmente, no hay informes en la literatura técnica sobre la variabilidad de piña, ni clasificación sistemática de sus cultivares. La producción comercial para mercados de exportación está basada en un número limitado de variedades y en algunos pequeños campos en el continente americano se producen variedades aún desconocidas (Py, 1969).

Las principales variedades comerciales son: Cayena lisa; Española de Singapur; Selacia Verde; Queen; Española Roja; Perola y Perolera.

Las características más sobresalientes de los diferentes cultivares más son:

***Cayena Lisa.*** Su ciclo de producción es de uno de los mas largos entre los cultivares; vulnerable a plagas y enfermedades; alto contenido de azúcar, 13 a 19°Brix; gran tolerancia al colapso del fruto; pulpa de color amarillo pálido; jugo amarillo translucido pero con alto contenido de azúcar.

***Española de Singapur.*** Básicamente usadas en procesos de enlatados es cultivada en la zona sur del continente asiático; peso promedio de 1 kg; pulpa color amarilla dorada; bajo contenido de ácido y de azúcar, 10 a 12 °Brix; alta calidad para la producción de jugo; buena productora de vástago e hijastro.

***Selacia Verde.*** Mutación obtenida a partir de la española de Singapur. La diferencia mas importante con el cultivar original son: hojas e inflorescencia de color verde, ojuelos de color Amarillo. En términos generales mantiene una gran parte de las características de la española de Singapur.

***Reina o Queen.*** Destinada al Mercado en fresco, el peso promedio 0.5 a 1 kg. La pulpa es de color Amarillo dorado; alto contenido de azúcar, 14 a 18°Brix; fuerte tolerancia al estrés, plagas y enfermedades, superando a la variedad Cayena lisa; altamente susceptible al frio y al obscurecimiento interno. Generalmente se cosecha antes de la madurez.

***Española roja.*** Cultivada ampliamente en las naciones caribeñas, su peso promedio de 1.2 a 2 kg; contenido medio de azúcar 12°Brix, pero con bajo nivel de acidez. Alta capacidad para producir vástago e hijuelos; elevada tolerancia a altas temperaturas y sequías, soporta el obscurecimiento interno y marchitamiento.

***Perola.*** Principalmente cultivada en Brasil. El fruto es cónico, pulpa blanca, peso promedio de 0.9 a 1.5 kg; alto contenido de azúcar, entre 13 y 16°Brix; alto contenido de ácido ascórbico; cultivar muy fuerte y resistente a la sequía, piojo arenoso y nemátodos, pero altamente sensible a la fusariosis (Nascente et al., 2005).

***Perolera.*** Peso promedio de 1.5 a 3 kg, bajo contenido de azucar (12°Brix), pulpa amarilla, fruto de forma cilíndrica; gran productora de vástagos, en promedio de 4 a 11; cultivar resistente a fusariosis; susceptible al daño del fruto; vulnerable al ataque de la mosca melanoloma.

Cayena Lisa (hawaiana), del grupo de las Cayenne, es la principal variedad destinada a la industrialización, es la variedad más importante del mundo, ya que tiene buenas cualidades para la industria enlatadora y de néctares. Posee de 60 a 80 hojas sin espinas a excepción de

la parte terminal de la hoja, fruta cilíndrica, ojos poco profundos, con un peso promedio de 2,5 Kg. Por otra parte, estudios de evaluación sensorial han demostrado la aceptabilidad de los consumidores por esta variedad (Bartolomé et a., 1995).

Sin embargo, recientemente se han introducido nuevas variedades comerciales con el propósito de mejorar la calidad de la oferta internacional de la piña tales como la MD2 (Golden ripe, Extra sweet y Maya gold) las cuales son híbridos desarrollados en Hawai a partir de Cayena lisa cuyo peso promedio es de 1.3 a 2.5 kg, de color naranja-amarillo intenso con un alto contenido de azúcar de 15 a 17 °Brix, y con frutos dulces, compactos y fibrosos. Las diferencias que presentan con respecto a la variedad Cayena lisa son: mayor resistencia al oscurecimiento interno, menor contenido de ácido ascórbico total, mayor susceptibilidad a la pudrición y mayor sensibilidad al *Phytophthora*. La variedad Josefina es un cultivar liberado en 1996 para el mercado en fresco, híbrido desarrollado a partir de otras dos clonaciones. Su ciclo de producción es anual y con generación de 2 a 3 vástagos por planta. Su peso promedio es de 1.1 a 1.3 kg. y con un alto contenido de azúcar (17 a 22 °Brix). Las diferencias con respecto a la variedad Cayena lisa son: mayor vida de anaquel, mayor contenido de azúcar, mayor resistencia al desorden del corazón negro y un menor ciclo de producción. Finalmente se logró la variedad RL41, híbrido obtenido a partir de los cultivares Cayena lisa y Manzana, con un peso promedio de 1.4 a 2 kg y con un alto contenido de azúcar de 15 a 18 °Brix. Las diferencias con respecto a la variedad Cayena lisa, aunque de similar acidez, pero con un mayor contenido de ácido ascórbico y un menor ciclo de producción, así como una menor resistencia a la pudrición y una mayor resistencia a la inducción floral (FAO, 2004).

### **1.3 Características del fruto de ananá**

La fruta de la ananá está constituida por la fusión de los tejidos de los frutos individuales y del eje de la inflorescencia. De cada flor se desarrolla un fruto individual, que aparece hacia el exterior en forma de un escudete poligonal, duro y prominente. El centro del fruto individual es prominente, y debajo de él está la cavidad externa de la flor, representada por una cámara de paredes endurecidas, de cuya base salen los restos de los estambres y del pistilo como hilos negros y duros. Hacia el interior quedan las celdas del ovario, en cuya parte superior están los óvulos o semillas, y la inferior está ocupada por cavidades grandes

de paredes brillantes, que formaban los nectarios. En algunos cultivares estas cavidades se reducen bastante, y sólo se distinguen como tres ranuras que irradian simétricamente de un punto central; en otros aparecen como cámaras vacías de considerable tamaño. Los tejidos internos, ricos en azúcar, corresponden en pequeña parte a las paredes del ovario, y en especial a la base de la bráctea y de los sépalos. Están unidos directamente al eje del fruto, del cual salen seis grupos de haces vasculares que conectan con las partes de la flor, y un grupo independiente que suple a la bráctea. El eje central aumenta de tamaño y contiene también azúcares, pero es más duro y fibroso que los frutos individuales (Py, 1969).

### 1.3.1 Composición química y valor nutricional

**Tabla I.1.** Composición general del ananá fresco maduro

ANÁLISIS	BASE HÚMEDA (%)
°Brix	10.8-17.5
Acidez titulable (ácido cítrico)	0.6-1.62
Cenizas	0.3-0.42
Humedad	81.2-86.2
Fibra	0.3-0.61
Extracto etéreo	0.2
Esteres (ppm)	1-250
Pigmentos (ppm de caroteno)	0.2-2.5
Nitrógeno total	0.045-0.115
Proteína	0.181
Nitrógeno soluble	0.079
Amoníaco	0.010
Aminoácidos totales	0.331

La composición del ananá ha sido investigada en su porción comestible. Los rangos de composición (Tabla I.1) que se reportan son debidos al grado de variación encontrado por las operaciones agrícolas y comerciales, factores ambientales y grado de madurez de la fruta. La piña tiene un contenido de humedad de 81.2 a 86.2 %, de 13-19 % de sólidos totales, de los cuales la sacarosa, glucosa y la fructuosa son los principales componentes. Los carbohidratos representan hasta el 85 % de los sólidos totales y la fibra del 2-3 %. De los ácidos orgánicos, el ácido cítrico es el más abundante. La pulpa se caracteriza por la

presencia de bajas cantidades de cenizas, compuestos nitrogenados y grasa en 0.1 %. Del 25-30 % de los compuestos nitrogenados corresponden a la proteína. De esta proporción casi el 80 % tiene actividad enzimática proteolítica conocida como Bromelina.

**Tabla I.2.** Composición nutricional por 100 g de fruta de ananá (USDA Handbook 8)

<b>Nutriente</b>	<b>Composición</b>
Agua (g)	86.50
Calorías	49.00
Proteínas, g	0.39
Grasa, g	0.43
Carbohidratos, g	12.39
Fibra cruda, g	0.54
Cenizas, mg	0.29
Calcio, mg	7.00
Fósforo, mg	7.00
Hierro, mg	0.37
Sodio, mg	1.00
Potasio, mg	113.00
Vitamina A, IU	23.00
Tiamina, mg	0.092
Riboflavina, mg	0.036
Niacina, mg	0.42
Ácido Ascórbico, mg	15.40

El ananá es una fruta de excelente calidad, rica en vitamina C y la cual puede ser consumida en estado de maduración completa como postre o en el desayuno (USDA, 1993).

## **1.4 Producción**

### **1.4.1 Situación actual y perspectivas**

El ananá es una de las frutas que tiene alta aceptación en forma procesada y que permite varios métodos de preservación: congelamiento, enlatado, la deshidratación osmótica y el secado. En el año 1989, se consumieron 544000 toneladas de ananá fresco y 873600 toneladas de fruta procesada (principalmente enlatada). En los últimos años el consumo en forma de conserva presenta aumentos significativos, hecho que estuvo acompañado de un mayor desarrollo industrial. Sin embargo, el rubro de los jugos el que mayor crecimiento ha presentado. En cambio a nivel mundial el mercado de ananá fresco se encuentra relativamente estancado, por la alta incidencia de los fletes (FAO, 2004).

El ananá es el segundo cultivo tropical de importancia mundial, aportando mas del 23 % del volumen mundial de frutos tropicales con 14,8 millones de toneladas (FAO, 2003). La producción a nivel mundial se inició alrededor del año 1500 cuando se propagó por Europa y se distribuyó en las regiones tropicales del resto del mundo. La variedad más famosa es la Cayena lisa (Smooth Cayenne) la cual fue introducida a Europa por la Guyana francesa. La forma de consumir ananá procesado (enlatado) se inició en Hawaii al final del 1800 y permitió el desarrollo industrial de esta fruta.

Tailandia, Filipinas, Brasil y China son los principales productores de ananá con cerca del 50 % de la producción mundial (FAO, 2004). La India junto con Nigeria, Kenya, Indonesia, México y Costa Rica son los países restantes que producen las mayores cosechas de piña (50 %). El 31 por ciento de la producción mundial de ananá corresponde a América Latina y el Caribe.

Según las previsiones, la producción y el comercio de frutas tropicales frescas aumentarán en el próximo decenio. Los países en desarrollo representan alrededor del 98 por ciento de la producción total, mientras que los países desarrollados absorben el 80 por ciento del comercio mundial de importación.

El ananá es la fruta mejor colocada en el mercado internacional ya que su comercio está orientado a países desarrollados como Japón, los EE.UU. y la Comunidad Europea. La Comunidad Europea importó el 33 por ciento de las piñas tropicales comercializadas en

todo el mundo en 2002, mientras que los Estados Unidos importaron el 37 por ciento y el Japón el 11 por ciento (FAO, 2003).

La producción de ananá para 2010 se pronostica en 15.8 millones de toneladas, cerca de un 26 por ciento de la producción mundial de frutas tropicales. A la región de Asia y el Pacífico correspondería el 45 por ciento de la producción, con un 36 por ciento en América Latina y el Caribe, y un 16 por ciento en África.

El crecimiento pronosticado en ese mercado debería atribuirse principalmente al crecimiento de los ingresos y de la población, así como a las tendencias del consumo. En relación al mercado de ventas según destino de uso, el 30% se consume en forma doméstica, un 6% se destina a exportación en fresco y un 64% con destino a industria, siendo notable en los últimos tres años el incremento en este sector. En relación a ello el de la conserva es el que presenta aumentos significativos, al igual que mayor desarrollo industrial, siendo el rubro de los jugos el que mayor crecimiento ha presentado.

#### **1.4.2 Situación de la Provincia de Misiones**

Tradicionalmente la Provincia de Misiones ha sido proveedora del 30% del consumo total de ananá fresco de la Argentina; su participación se redujo a menos del 3% del mercado en la década pasada. El 97% restante proviene del exterior, principalmente de Brasil. No obstante, la producción de ananá en la provincia de Misiones experimenta hoy un resurgimiento impulsado por el tipo de cambio y un mercado fuertemente demandante.

Un fundamental paso en este sentido es la puesta en funcionamiento de la Biofábrica (PTMI), cuyo programa de trabajo establece entre sus prioridades a la producción de microplantas de ananá, a partir de material genético seleccionado. Un segundo factor clave es la experiencia que viene realizando un conjunto de productores de la zona junto a técnicos del INTA en producir ananá de calidad bajo invernaderos.

Estos avances tecnológicos, representativos de las expectativas que el sector despierta, así como de los recursos humanos y tecnológicos que moviliza, deben ser complementados con otras acciones que los hilvanen en una organización que permita el pleno desarrollo del potencial económico y social que el mismo tiene.

#### **1.5 Productos derivados del ananá**

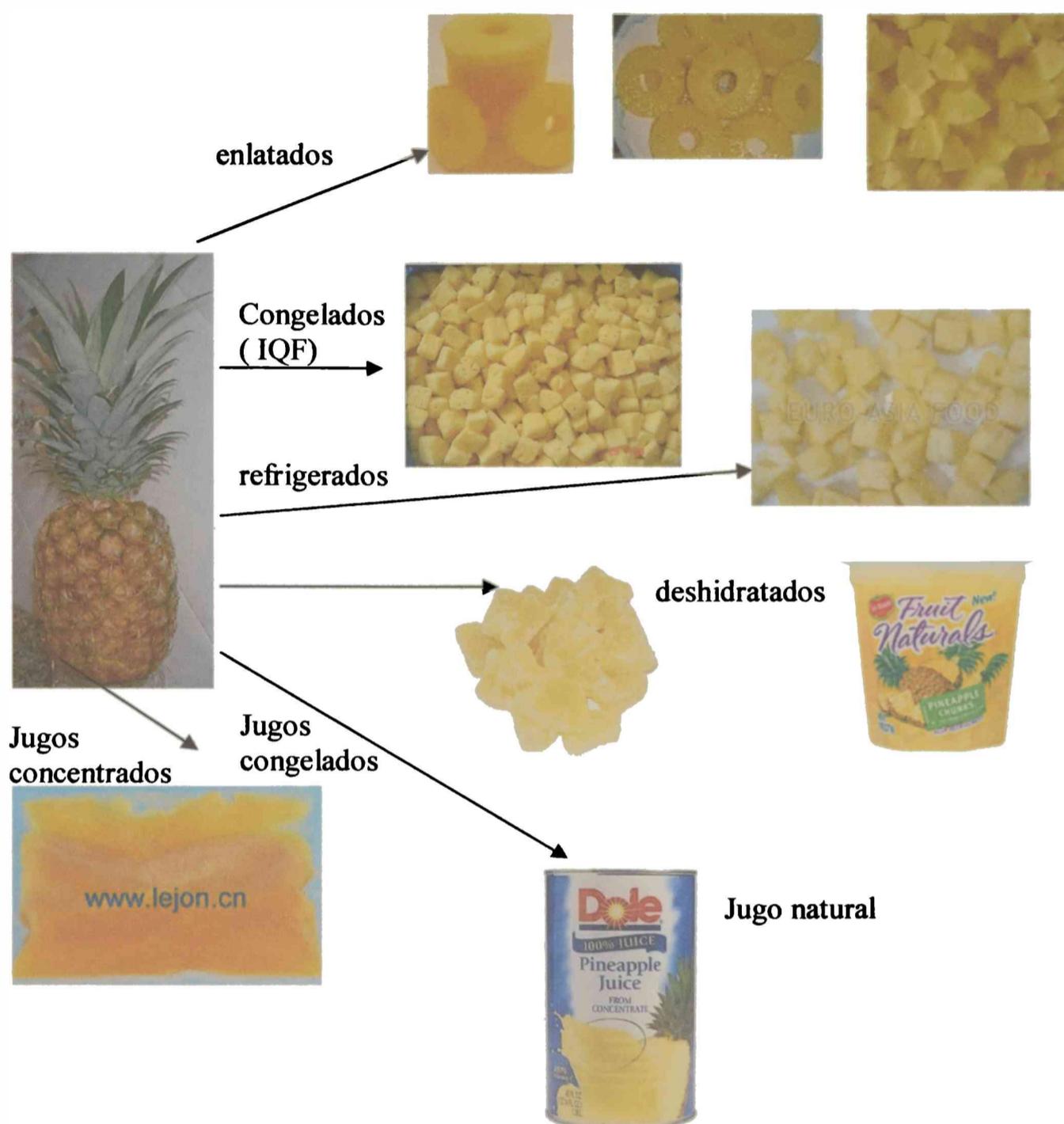
Los productos finales que se comercializan en estado fresco o procesado incluyen:

- Ananá fresco
- Jugos de fruta
- Pulpas enlatadas
- Jaleas
- Mermeladas
- Fruta deshidratada

La comercialización del ananá y sus derivados se realiza de diferentes formas. Tradicionalmente la más común es el comercio de piña fresca, aunque con el desarrollo de los mercados y el cambio en las preferencias de los consumidores, el producto se ha ido industrializando y hoy en día se encuentra disponible de diferentes formas. Los productos más importantes en el comercio mundial son sin duda ananá fresco, ananá enlatado y el jugo de ananá.

Doce naciones concentran el 90 % de la demanda mundial de ananá fresco, siendo Estados Unidos el mercado con mayor participación, además de Francia, Japón, Bélgica, Italia, Alemania, Canadá, España, Reino Unido, Corea, Países Bajos y Singapur.

En cuanto al comercio mundial de jugo simple de ananá, la oferta es altamente concentrada por Filipinas y Tailandia ya que ambas naciones proveen el 65 % del volumen total, mientras que Indonesia es el líder mundial en el abasto de jugo concentrado (70 %). En general, el ananá enlatado es el producto más importante dentro del comercio mundial de ananá y derivados. El consumo de ananá enlatado se eleva sustancialmente al final de cada año en los principales mercados debido a la presencia de la época navideña, por el aumento en la elaboración de ensaladas y una mayor demanda por parte de los establecimientos de comida rápida. No obstante, el jugo simple y el jugo concentrado tienen un mayor precio por tonelada. Tailandia, Filipinas e Indonesia proveen cerca del 80% de la oferta de ananá enlatado que se comercializa en el mercado mundial. En tanto que Estados Unidos y Alemania adquieren la mayor parte de la oferta mundial de ananá enlatado, aunque desde 1990 la demanda en estos dos mercados ha fluctuado continuamente. (FAO, 2004).



**Figura 1.2.** Esquema de los diferentes productos comerciales elaborados en base a ananá

Por otro lado, los productos precortados de ananá, empacados al vacío y almacenados en frío que presentan la facilidad de consumirse en el momento y que no requieren tiempo de preparación, están ganando rápidamente terreno en numerosas regiones como Hawai y Japón, donde el 10 y el 20 % del ananá que se consume es bajo esta forma, respectivamente.

Entre los productos procesados, las frutas deshidratadas se destacan por ser normalmente de fácil obtención, mantener muchas de las características del producto natural, tener un

tiempo de vida útil más prolongado que la fruta fresca sin refrigeración y por reducir los costos de transporte respecto del material fresco.

Las frutas deshidratadas son consumidas principalmente como snacks; no obstante, la demanda de frutas deshidratadas se ve positivamente influenciada por el uso de estos ingredientes en la industria de elaboración de productos para el desayuno como cereales, barras nutritivas y postres.

Los receptores de frutas deshidratadas se pueden clasificar en dos grandes grupos: distribuidores comerciales tales como panaderías y tiendas de delicatessen y las industrias, tales como los fabricantes de cereales, snacks y alimentos procesados. Se estima que para el año 2002 esta industria habría crecido en 99 millones de euros.

Respecto de las posibilidades comerciales de las frutas deshidratadas, a todos los factores propulsores del consumo de frutas frescas, se les suma la posibilidad de consumo durante todo el año y más practicidad de uso. Por otra parte, se habilita la posibilidad de exportación de algunos productos vegetales debido a que luego del procesamiento dejan de estar sujetos a leyes de protección de plantas de países importadores.

Acerca del mercado mundial de de frutas deshidratadas, en el año 2002 los principales importadores, en volumen, fueron China, Rusia, Alemania y Malasia (Figura I.3). En valor, los principales importadores fueron Reino Unido, EE.UU., Alemania y China (Figura I.4).

En la Argentina las empresas procesadoras de frutas deshidratadas poseen un nivel tecnológico comparable al de los principales países productores. La capacidad instalada es de aproximadamente 1300 toneladas anuales. Las firmas que deshidratan manzana, presentan una gran estacionalidad en el aprovechamiento industrial de sus instalaciones. El 54% de la capacidad instalada se destina a ciruela deshidratada y el restante se utiliza para procesar manzana, uva, damasco y durazno. El 95 % de la producción nacional de ciruelas secas está concentrado en Mendoza. De eso, el 90 % se exporta.

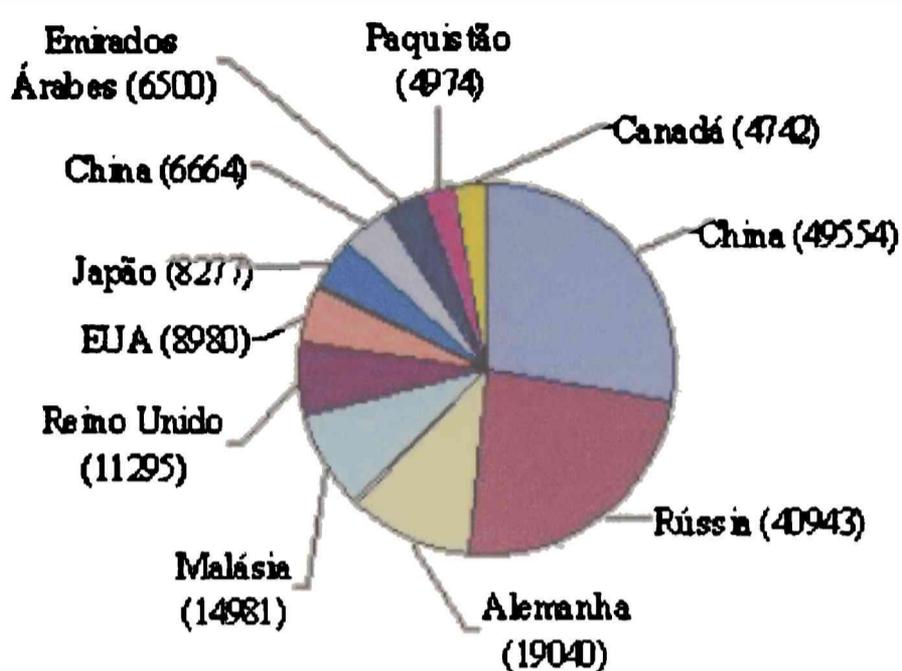


Figura I.3 – Importación de frutas deshidratadas en el año 2002, en miles de toneladas (FAO, 2003)

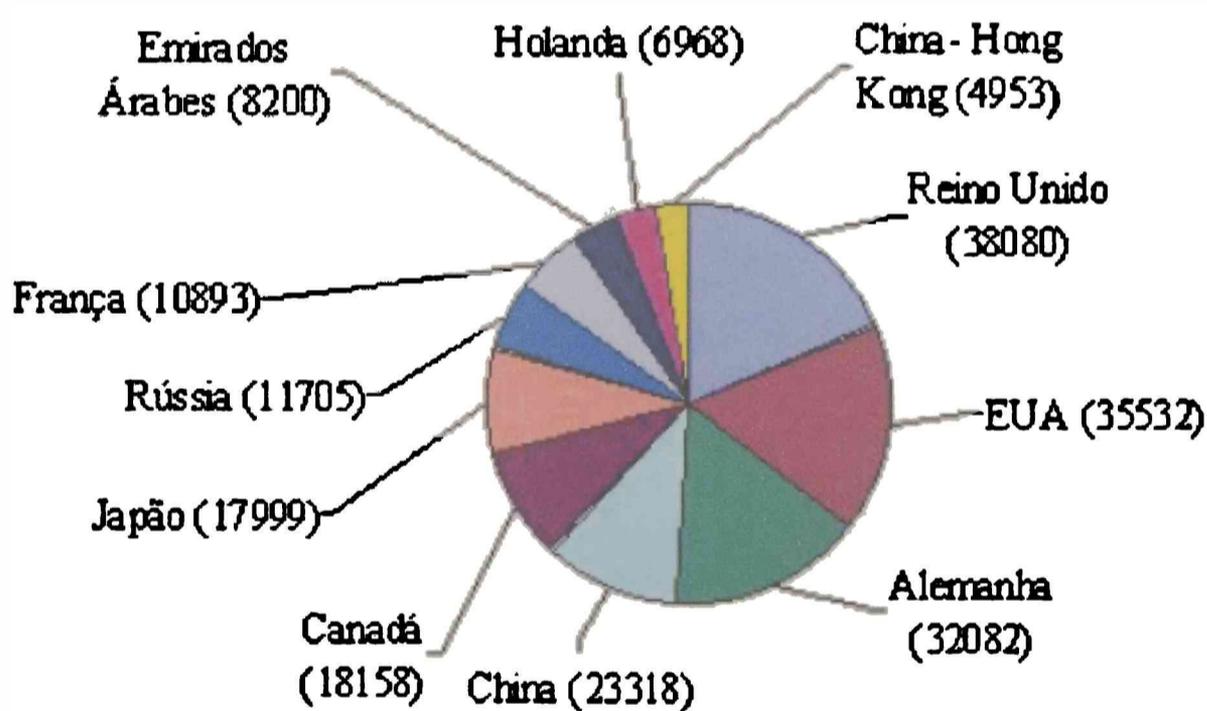


Figura I.4 – Importación de frutas deshidratadas en el año 2002, en US\$ 1000 (FAO, 2003)

## **2. Secado**

### **2.1 El proceso de secado**

El secado es un proceso complejo que involucra simultáneamente los fenómenos de transferencia de calor y de masa (Ruiz-López et al., 2004; Maroulis et al., 1995). Dependiendo de la aplicación, diferentes fenómenos son dominantes y definen la velocidad del proceso.

En el secado convectivo de sólidos, los fenómenos que deben ser considerados son la difusión de humedad en el sólido hacia su superficie externa, la vaporización y la transferencia convectiva del vapor en la corriente de aire, la transferencia de calor por conducción dentro de la masa sólida, y la transferencia de calor por convección desde el aire a la superficie del sólido (Maroulis et al., 1995).

Para cada fenómeno se debe suponer un mecanismo que lo describa. Cada mecanismo es, generalmente, expresado usando una fuerza impulsora y una propiedad de transporte (coeficiente). Las propiedades de transporte usadas normalmente son el coeficiente de difusión de la humedad, el coeficiente de transferencia de masa de la capa de límite, la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia de calor de la capa de límite.

Existen diversas teorías para explicar el fenómeno de secado. Las más importantes son aquellas que intentan explicar los fenómenos físicos internos que gobiernan el período de velocidad decreciente de secado. Dentro de las teorías existentes, el problema reside en encontrar una teoría aplicable a los materiales biológicos. Algunas de estas teorías son: difusión líquida, movimiento de líquido por capilaridad, vaporización-condensación, difusión de vapor, etc. (Park, 1987).

Uno de los primeros investigadores en interpretar el secado como un fenómeno de difusión interna de agua líquida fue Lewis (1921). Crank (1975) presentó diversas soluciones analíticas para la 2<sup>da</sup> Ley de Fick en forma de series infinitas considerando al sólido bajo diferentes formas geométricas, distribución uniforme de la humedad inicial, volumen, temperatura y propiedades de transporte constantes.

Los fenómenos de transferencia de calor y masa que ocurren durante el secado han sido modelados bajo dos tendencias generales: modelos detallados y modelos simplificados (Zogzas & Maroulis, 1996).

Los modelos detallados utilizan las ecuaciones simultáneas de transferencia de calor y masa con propiedades variables y encogimiento. Las ecuaciones constituyen un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales y acopladas. Algunos autores utilizan modelos detallados para predecir la cinética de secado de productos alimenticios (Balaban & Pigott, 1988; Wang & Brennan, 1995). La única manera de resolver estas ecuaciones diferenciales es a través de métodos numéricos (elementos finitos o diferencias finitas). Los modelos detallados son de gran importancia en los estudios científicos del secado de alimentos; sin embargo su aplicación en el diseño y simulación suele no ser prácticamente viable.

Los modelos teóricos simplificados se obtienen a partir de los modelos detallados de manera tal de que las ecuaciones diferenciales de transferencia de masa tengan solución analítica. Las simplificaciones más comunes son (Hernandez et al., 2000):

- la temperatura en el alimento es constante, o sea se desprecia la transferencia de calor
- no hay encogimiento
- difusividad del agua dentro del producto es constante.

Estas suposiciones simplifican las ecuaciones de transferencia de masa pero disminuye la habilidad de reproducir los datos experimentales de cinética de secado. No obstante las simplificaciones han sido ampliamente utilizadas para predecir la cinética de secado (Hernandez et al., 2000; Kiranoudis et al., 1995). Mulet (1994) evaluó modelos con diferentes niveles de complejidad y concluyó que el principal factor a ser considerado en el modelo es el encogimiento.

Finalmente, en el modelado de secado de vegetales por convección se encuentran modelos matemáticos teóricos como así también fórmulas empíricas. Las fórmulas empíricas establecen la existencia de una nueva regularidad empírica o pueden corroborar de manera más exacta el comportamiento ya conocido, pero no proporcionan ninguna explicación teórica. Presentan un valor insignificante para la ciencia y, algunas veces, limitada importancia para la tecnología. Sin embargo, pueden ser muy útiles para probar o ensayar los modelos teóricos puesto que permiten reproducir los resultados de las medidas de la acción de los estudios originales de una manera precisa y continua. Comparando los resultados obtenidos de un modelo teórico con los resultados derivados de las fórmulas empíricas que se obtienen de medidas de la acción original, se determinan los errores y se

evalúa el modelo. También son muy útiles cuando el modelo físico es tan complejo que no existen modelos matemáticos únicos que expliquen el fenómeno o requieren de un número tal de parámetros que su aplicación se torna impráctica. Los modelos empíricos de mayor uso en el secado de alimentos son los que figuran en la Tabla I.3

**Tabla I.3.** Modelos empíricos aplicados al secado de productos alimenticios

Nombre del modelo	Modelo	Referencias
Newton	$MR = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-kt)$	Doymaz, 2007; Vega Galvez et al., 2007
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Doymaz, 2007; Ghodake et al., 2006; Simal et al., 2005; Vega Galvez et al., 2007
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^n$	Doymaz, 2007; Arora et al., 2006
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Doymaz, 2007; Arora et al., 2006; Ghodake et al., 2006; Vega Galvez et al., 2007
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	Doymaz, 2007; Simal et al., 2005
Logarítmico con dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Doymaz, 2007
Exponencial con dos términos	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Doymaz, 2007
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Doymaz, 2007

En relación al modelado de procesos de secado, se pueden hacer los siguientes comentarios prácticos:

- Los estudios de procesos de secado de vegetales y la elaboración de los resultados de las medidas del proceso deben comenzar siempre con un análisis del estado actual de la teoría matemática del secado de cuerpos sólidos.
- La incompatibilidad entre los resultados de mediciones y los resultados obtenidos de la teoría es también información valiosa para la ciencia y la práctica. Puede inspirar problemas de investigación científica o tecnológica.
- Los modelos matemáticos teóricos de procesos de secado también permiten proporcionar información sobre resultados de los experimentos que no se han realizado todavía, que es una de las funciones de la ciencia de importancia crucial para la tecnología.

• Aplicaciones prácticas de estas posibilidades científicas pueden requerir, sin embargo, la compilación y tabulación sistemática de información de las propiedades físicas de los vegetales, que son necesarias en modelos matemáticos del secado de vegetales.

## 2.2 Etapas de la curva de secado

En vegetales de alta humedad se distinguen tres etapas de secado (I, II y III), como se representa en la Figura 1.5.

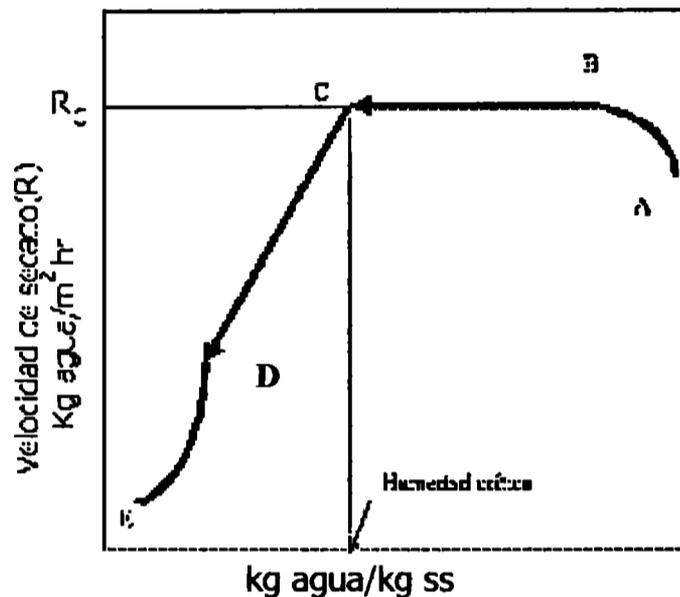


Figura 1.5. Curva típica de secado

Línea A-B: Al principio del secado se puede observar un corto periodo de inducción donde el material se adapta rápidamente a las condiciones de secado, el cual depende de numerosos factores, y ya que este periodo de tiempo es muy corto en comparación con el tiempo total del proceso de secado por lo general no se tiene en cuenta en el modelado de la cinética de secado. Durante este período el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor desde el medio de secado.

Etapa I (B-C): Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el medio de secado (aire o gas) permanece en estado estacionario y, en general, depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en

esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento. Este período raramente es observado durante el secado de materiales biológicos (Nogueira, 1991).

Etapas II y III (C-E): Finalmente se observa una etapa de secado más lenta para valores de humedad del producto menores a 1 g agua/g m.s., es el período de velocidad de secado decreciente; donde predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación. Es en esta etapa de secado donde cobra mayor importancia la simulación del proceso mediante la teoría de difusión molecular del agua. La migración por difusión de la humedad contenida en un alimento es el mecanismo predominante en el secado de la mayoría alimentos, principalmente en los vegetales (Geankoplis, 1983). Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Según Chirife (1983) los principales mecanismos de transporte durante este período son: difusión líquida, movimiento capilar y difusión de vapor.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero (C-D) al segundo (D-E) período de velocidad decreciente, llamada humedad crítica. Esta depende del tipo del material y de la velocidad de secado en el primer período.

La velocidad de las reacciones químicas y los cambios físicos que ocurren en el interior del alimento durante el secado es fuertemente influenciada por la variación de humedad durante la deshidratación. Es por ello que numerosos estudios se han efectuado para representar el período de velocidad decreciente a través de modelos matemáticos.

Para el modelado de la cinética de transferencia de masa (agua) ocurrida durante el secado de vegetales por aire caliente, generalmente se utilizan dos ecuaciones, en función de las

dos últimas etapas observadas en el proceso, puesto que la etapa de velocidad constante es muy breve o inexistente.

La Ecuación I.1 describe la segunda etapa del secado, donde la velocidad de secado decrece linealmente hasta una humedad cercana a 1 g agua/g materia seca, ya que a partir de ese punto no se observa una línea recta, dando origen a la III etapa de secado.

En esta ecuación,  $W$  es la humedad en base seca ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}$ ) a cada tiempo,  $W_e$  es la humedad de equilibrio ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}$ ),  $g_{\text{ms}}$  gramos de masa seca,  $-dW/dt$  es la velocidad de secado ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}\cdot s^{-1}$ ),  $t$  es el tiempo en segundos,  $k$  y  $b$  son los parámetros cinéticos considerados para esta etapa de secado, los que se obtendrán para las diferentes temperaturas de trabajo para cada material específico.

$$-\frac{dW}{dt} = k(W - W_e) + b \quad (I.1)$$

Para modelar la tercera etapa de secado usualmente se utiliza el modelo difusional. Este método tradicionalmente ha sido utilizado en el estudio de la transferencia de masa en estado no-estacionario para el secado de productos agrícolas, si se consideran como sólidos húmedos homogéneos (Vega et al., 2005). Por ejemplo la ecuación integrada de la segunda ley de Fick para tiempos largos y geometría plana en una dimensión, representando el primer término del desarrollo de la serie, tiene la forma de la Ecuación I.2 (Crank, 1975).

$$MR = \frac{W_e - W}{W_e - W_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_w \pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (I.2)$$

En esta ecuación,  $MR$  es la fuerza impulsora,  $W$  es la humedad en base seca ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}$ ) a cada tiempo,  $W_0$  es la humedad inicial ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}$ ),  $W_e$  es la humedad de equilibrio ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{ms}}$ ),  $t$  es el tiempo en segundo,  $l$  es el semiespesor de la lámina (m) y  $D_w$  es el coeficiente de difusión expresado en  $m^2\cdot s^{-1}$ .

Las medidas del secado por convección de partículas aisladas de vegetales cortados de diferentes clases muestran, casi desde el principio del proceso, estar en período de velocidad decreciente de secado. Por lo cual muchos autores (Mulet et al., 1989a,b; Doymaz, 2007; Simal et al., 2005) han estado modelando tales procesos mediante

ecuaciones exponenciales sin ningún análisis teórico del modelo de secado. Tales ecuaciones son formas simplificadas de una ecuación teórica en la segunda etapa del secado de cuerpos sólidos con un contenido inicial de agua apropiadamente bajo:

$$W = W_e + (W_0 - W_e) \exp(-kt) \quad (I.3)$$

La Ecuación I.3 representa la segunda etapa del secado y a pesar de que reproduce bien la cinética del secado de vegetales cortados, no tiene ningún análisis teórico del período inicial del secado de vegetales con alta humedad. De acuerdo con la teoría matemática, clásica del secado por convección de cuerpos sólidos, los vegetales cortados y muy húmedos deberían presentar un período inicial de secado a velocidad constante, según la ecuación:

$$W = W_0 - k_0 t \quad (I.4)$$

### 2.3 Modelos existentes en secado de frutas

La presente demanda de productos de alta calidad en el mercado alimenticio requiere productos deshidratados que mantengan un alto nivel nutricional y propiedades sensoriales semejantes al alimento fresco. Una comprensión completa de los factores responsables de la disminución de la calidad del producto durante el proceso de deshidratación es relevante. Las modificaciones fisicoquímicas que suceden en el alimento durante el secado son afectadas por la cinética de variación de humedad durante la deshidratación.

Ruiz-López et al. (2004) estimaron la evolución teórica de la humedad y de la temperatura durante el secado de placas de zanahorias aplicando ecuaciones de transferencia de calor y de masa en estado no estacionario, usando propiedades constantes y variables. Los resultados demostraron que la evolución de la humedad, estimada con propiedades constantes, reproduce apropiadamente la evolución experimental. La estimación de la evolución de la humedad para propiedades variables reproduce algo mejor el comportamiento experimental, pero el esfuerzo numérico se aumenta considerablemente. Este trabajo demuestra que la suposición de propiedades constantes tiene aplicación para propósitos de ingeniería y las propiedades variables dan información más fenomenológica y son muy útiles para otras predicciones.

El modelo propuesto en el trabajo publicado por Hernandez et al. (2000) proporciona una descripción matemática simple para la cinética de secado de mango y mandioca, en niveles de humedad alta y considera la existencia de contracción durante el proceso. Este modelo considera propiedades de transporte y temperatura constantes. Las soluciones del modelo propuesto reprodujeron con exactitud moderada la solución numérica de la ecuación de transferencia de masa y las curvas experimentales de secado con  $r^2$  de 0.92 para el mango y 0.97 para la mandioca.

Karim & Hawlader (2005) desarrollaron un modelo matemático para describir los procesos de transferencia de calor y de materia que tienen lugar dentro de un secadero modelo durante el secado de banana. La contracción del material se consideró en el modelo desarrollado. El modelo incluye características del material y del equipo. Las ecuaciones resultantes se resolvieron simultáneamente usando técnicas numéricas. En esta publicación se observa la existencia del perfil de temperatura y de humedad en la fruta durante el proceso.

Wang & Brennan (1995) plantean un modelo matemático para el secado de papas que contempla la transferencia simultánea de calor y masa. El modelo es validado con interesantes datos experimentales: a través de medidas de temperatura con delgadas termocuplas se registró el perfil de temperatura con el cual se simuló el perfil de humedad en las muestras de papa de 10 mm de espesor. Además se consideró la variación de volumen en el sólido. La temperatura del sólido no varía notablemente en función de la variable dimensional a cada tiempo (es decir, no presenta perfil de temperatura), pero cambia notoriamente con el tiempo de secado. Del centro a la superficie hay aproximadamente 1 °C de diferencia, en tanto que se registra un incremento de 5 °C en el sólido durante la primera hora de secado. El perfil de humedad en la papa es más drástico que el de temperatura. Los autores concluyen que el encogimiento tiene mucha influencia en las propiedades de transporte calculadas durante el secado de papas y que debería ser considerado en los modelos predictivos de secado de vegetales. La distribución de humedad y temperatura podría ser utilizada para las predicciones de algunas reacciones químicas que ocurren durante el secado, ya que las mismas suelen estar afectadas por estas variables (humedad y temperatura).

Las características de muestras (rebanadas) de kiwi durante el secado con aire caliente tales como cambios de contenido de humedad y de la composición de ácido L-ascórbico fueron analizadas por Orikasa et al. (2008). Para modelar los cambios del contenido de agua del kiwi durante el secado con aire caliente, se utilizó una combinación del modelo exponencial y del modelo de la placa plana infinita para la ecuación de difusión, considerando la existencia de dos períodos de velocidad decreciente. La pérdida de vitamina C sigue una cinética de primer orden y se incrementa con la temperatura de secado.

Las características del secado con aire de rebanadas de calabaza fueron investigadas en un secadero de aire caliente a escala laboratorio (Doymaz, 2007). Los resultados indicaron que el secado de calabaza tiene lugar en período de velocidad decreciente, no se observó período de velocidad constante. Los datos experimentales de humedad durante el proceso se ajustaron a modelos de secado en capa fina empíricos como el de Wang y Singh y semi-teóricos: Lewis, Henderson-Pabis, Page, Page modificado, logarítmico, exponencial, difusional, de Verma. Los mejores ajustes se obtuvieron a partir del modelo exponencial y de Verma, con valores de  $r^2$  superiores a 0.98.

Estudios similares en lo que respecta al ajuste de datos experimentales de humedad a diferentes modelos se encontraron para secado de damasco (Togrul & Pehlivan, 2003). En todos los casos los modelos empíricos y semi-empíricos explican muy bien el comportamiento de material heterogéneo y de diferente geometría, pero no pueden explicar el fenómeno y muchas veces los resultados no se pueden extrapolar a otras condiciones de trabajo.

## **2.4 Encogimiento del material durante el secado**

Una de los más importantes cambios físicos que el alimento sufre durante el secado es la reducción del volumen. La pérdida de agua es un fenómeno que causa tensiones en la estructura celular del alimento, provocando cambios en sus dimensiones.

Desde el punto de vista de la calidad, los cambios en la forma, pérdida de volumen y aumento de la dureza causan, en la mayoría de los casos, una impresión negativa en el consumidor. Otra importante consecuencia del encogimiento es la disminución de la capacidad de rehidratación del producto seco.

Desde el punto de vista de la ingeniería del proceso, los cambios en el volumen afectan las propiedades de transporte y por lo tanto alteran las predicciones del tiempo de procesamiento, entre otros.

Desde el punto de vista matemático, la pérdida de volumen durante el secado cambia las condiciones de contorno, además de alterar la constancia de las propiedades de transporte, lo cual afecta la resolución de la segunda Ley de Fick.

En la bibliografía se encuentran numerosos trabajos que demuestran la variación de volumen en frutas y hortalizas durante el secado (Mulet et al., 2000; Suzuki et al., 1976; Lozano et al., 1983; Lang et al., 1994; Hernandez et al., 2000, Mayor & Sereno, 2004).

Estos datos experimentales denotan la necesidad de incorporar el encogimiento en los modelos de secado, principalmente cuando se trata de alimentos de alta humedad, donde el encogimiento es un aspecto clave en el fenómeno de deshidratación.

El coeficiente de difusión es afectado por el encogimiento (Queiroz & Nebra, 2001). De acuerdo a Islam & Mujumdar (2003) este efecto se refleja en una disminución del coeficiente de difusión efectivo verdadero. Cuando el coeficiente de difusión se mide a partir de datos experimentales de secado, el efecto del contenido de agua y el encogimiento no se individualizan.

Por simplicidad y posibilidad de que ocurra, frecuentemente se considera que el encogimiento se produce solamente en la dirección del flujo de agua y se formula alguna expresión que vincule la dimensión característica del material y la humedad del mismo. Mayor & Sereno (2004) muestran una clasificación de modelos de encogimiento aplicados al secado de alimentos. Estos modelos se clasificaron en dos grandes grupos y en ambos casos los modelos se dividen en lineales y no lineales:

Modelos Fundamentales: los modelos fundamentales están basados en interpretaciones físicas de los sistemas alimenticios estudiados e intentan predecir cambios en la geometría del material basados en las leyes de conservación de masa y volumen. Los modelos matemáticos fundamentales permiten evaluar cambios en el volumen sin cálculos matemáticos complicados ni precisan de gran cantidad de ensayos experimentales, a todas las condiciones del proceso, como es el caso de los modelos empíricos (Rahman et al., 1996; Mayor & Sereno, 2004).

**Modelos Empíricos:** los modelos empíricos consisten en aplicar un ajuste a los datos experimentales de encogimiento en función del contenido de agua del material. Estos modelos usualmente presentan un buen ajuste a los datos experimentales, pero su aplicación es limitada debido a su dependencia con las condiciones de secado y con las características del material. Estos modelos requieren de muchos ensayos experimentales y no deberían ser extrapolados. Sin embargo han sido usados en los modelos de secado más complejos con razonable éxito (Akiyama & Hayakawa, 2000; Simal et al., 1996)

Los métodos de solución de las ecuaciones del modelo de secado que incluyen el encogimiento entre sus consideraciones pueden agruparse en:

- Soluciones analíticas: las soluciones analíticas que incluyen encogimiento son escasas y suelen estar vinculadas a los problemas con frontera móvil. Las aproximaciones utilizadas frecuentemente consisten en considerar que en un pequeño intervalo de tiempo las dimensiones del material y las propiedades de transporte son constantes y pueden aplicarse las soluciones analíticas del modelo sin encogimiento (Di Matteo et al., 2003). Así se determina la humedad media del material aplicando las soluciones analíticas en un paso de tiempo ( $\Delta t$ ). El espesor y las propiedades de transporte son evaluados a este nuevo valor de humedad y así sucesivamente el procedimiento se repite hasta el fin del proceso de secado. Para aplicar este procedimiento se requiere una expresión que relacione la dimensión del material con el contenido de agua.

- Soluciones numéricas: los métodos en diferencias finitas han sido ampliamente utilizados para encontrar la solución de las ecuaciones diferenciales de secado.

En los problemas de secado, principalmente en alimentos de alta humedad, la frontera no es constante (existe encogimiento) y la posición de la frontera es a menudo determinada a través de una relación entre la dimensión del material y la humedad del mismo (Katekawa & Silva, 2006).

Otra aproximación es la transformación de coordenadas o método de inmovilización de frontera (Katekawa & Silva, 2006). El número de puntos de la grilla es constante pero el espaciado entre cada punto es variable con los cambios en la humedad del sólido. A cada paso del tiempo se calcula la humedad y se utiliza para predecir las dimensiones de la muestra.

Otra técnica alternativa es el método de los elementos finitos. Este método se basa en las leyes de conservación y puede aplicar técnicas que adaptan la grilla para simular el desplazamiento del material. Esta técnica ha sido aplicada al secado de materiales deformables (Perré & May, 2001; Perré & Passard, 2004).

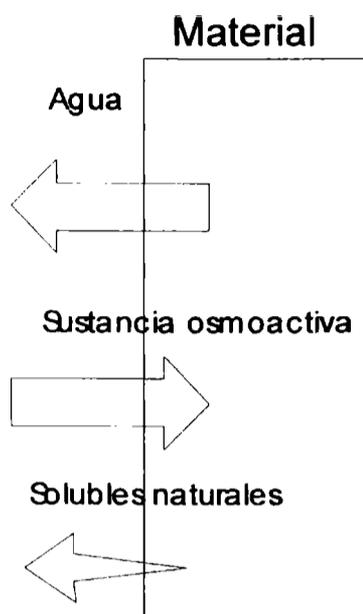
En resumen, en la actualidad se cuenta con las técnicas computacionales para resolver los problemas de secado que involucren el encogimiento del material y con numerosos modelos que aplican tanto leyes fenomenológicas como ecuaciones empíricas para describir el encogimiento de alimentos de alta humedad como frutas y hortalizas; no obstante para una solución confiable del problema es preciso efectuar ensayos experimentales de secado que convaliden el modelo elegido cuando se trata de un material o proceso diferente a los previamente estudiados.

### **3. Deshidratación osmótica**

#### **3.1 El proceso de deshidratación osmótica**

La deshidratación osmótica es una técnica de deshidratación parcial de productos alimenticios ricos en agua, especialmente frutas y hortalizas, que consiste en la inmersión de los mismos en soluciones acuosas de azúcares o sales de alta presión osmótica. Esto da lugar a dos procesos simultáneos: por una parte el movimiento de agua desde el alimento hacia la solución hipertónica; y por la otra la impregnación del sólido con el soluto en cuestión (azúcar o sal).

La deshidratación osmótica generalmente no reduce la actividad acuosa del producto lo suficiente para que pueda ser considerado un alimento estable. El proceso extiende la vida media del material pero no lo preserva. De aquí la necesidad de aplicar métodos de preservación complementarios tales como congelado, esterilizado, pasteurizado o secado a alimentos deshidratados osmóticamente. No obstante la principal ventaja de la ósmosis respecto del secado tradicional con aire caliente es que ésta provoca menos daños al color y al aroma que los tratamientos térmicos. Cuando se emplea como un tratamiento previo al congelado puede ayudar a preservar la textura del alimento (Talens et al., 2002b).



**Figura 1.6:** transferencia de masa en la deshidratación osmótica

El flujo de agua y el flujo de soluto durante este proceso se deben a que la solución tiene una presión osmótica mayor y por ende una menor actividad acuosa que el alimento a deshidratar, lo que genera un movimiento de agua hacia el exterior del sólido. Durante la deshidratación osmótica, la fase líquida del alimento está separada de la solución hipertónica por las membranas celulares, por lo cual el equilibrio entre fases se logra cuando se igualan los potenciales químicos a ambos lados de la membrana, lo que depende principalmente de la reducción de la actividad acuosa dentro de las membranas celulares del alimento (Gekas, 1992). El equilibrio o la modificación de los potenciales químicos ocurren por el intercambio de agua y de sólidos a través de la membrana (Sablani & Rahman, 2003; Parjoko et al., 1996). Las membranas celulares actúan como membranas semipermeables, pero son sólo parcialmente selectivas, por lo que la transferencia de algunos compuestos hidrosolubles es inevitable: algunas sales, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas, responsables del aroma, sabor y color, son acarreadas por el agua desde el interior de las células (Sablani & Rhaman, 2003) al mismo tiempo que algo de soluto osmoactivo (azúcar o sal) difunde hacia el interior de las mismas (Saurel et al., 1994). Este último movimiento depende principalmente del peso molecular del soluto utilizado. Por lo general la permeabilidad del tejido vegetal a los azúcares y otros compuestos de alto peso molecular es baja por lo que el material se impregna con la sustancia osmoactiva en una capa superficial solamente. En otros casos, el soluto osmoactivo no puede migrar dentro de

la célula pero sí puede penetrar dentro de los espacios intercelulares, dependiendo principalmente de la estructura del tejido vegetal. Por lo tanto la transferencia de masa ocurre en regiones específicas del tejido de acuerdo a la estructura celular: pared celular, membrana celular y espacios intercelulares (Shi & Le Maguer, 2002).

El agua, por otro lado, se remueve por ósmosis y los líquidos celulares se concentran sin cambio de fase del solvente, lo que hace al proceso favorable desde el punto de vista energético. El flujo de agua es mucho mayor que el flujo a contracorriente de la sustancia osmoactiva debido a que el agua puede difundir más fácilmente que los solutos a través de la membrana celular (Sablani & Rahman, 2003), siendo el coeficiente de difusión del agua de 10 a 100 veces mayor que el de los azúcares tradicionalmente utilizados en frutas (glucosa, fructosa y sacarosa) en un rango de temperaturas de 25 a 75 °C (Lazarides et al., 1997; Falade et al., 2007). Por esta razón el proceso es llamado deshidratación osmótica.

### **3.2 Ventajas y desventajas de la ósmosis.**

Las principales ventajas observadas de la aplicación del proceso de deshidratación osmótica en la preservación de frutas pueden sintetizarse:

- El agua sale de la fruta a bajas temperaturas y en estado líquido, lo cual evita las pérdidas de aromas propios de la fruta, que se volatilizarían o descompondrían a altas temperaturas (Talens et al., 2002a).
- La ausencia de oxígeno en el interior de la masa de jarabe donde se halla la fruta evita las correspondientes reacciones de oxidación que afectan directamente la apariencia del producto final. La ausencia de oxígeno también podría evitar algunas reacciones de deterioro nutricional. Durante el almacenamiento del producto deshidratado, se inhibe la transferencia de oxígeno a la fruta por la presencia de azúcar sobre la superficie de la misma (Rodrigues et al., 2003; Riva et al., 2005).
- La fruta obtenida conserva en alto grado sus características de color, sabor y aroma, mejor que en el secado térmico (Riva et al., 2005).
- Con un grado de deshidratación apropiado se logra prolongar la vida útil del producto.
- Esta técnica también presenta interesantes ventajas económicas, teniendo en cuenta la baja inversión inicial en equipos, mano de obra poco calificada, bajo consumo de energía eléctrica y además los jarabes que se producen, pueden ser utilizados en la

elaboración de yoghurts, néctares, etc.) a fin de aprovechar su poder edulcorante y contenido de aromas y sabores de la fruta osmo-deshidratada (Castro et al., 1998a; García-Martínez et al., 2002).

- Por otra parte el uso de azúcar (sacarosa) o jarabes y melazas tan disponibles en nuestro medio rural, con la posibilidad de su reutilización bien sea en nuevos procesos o para edulcorar otros productos la hace una técnica interesante.
- Es posible introducir solutos y especies tales como agentes conservantes, nutrientes, saborizantes o mejoradores de textura a través de la solución osmótica (Gras et al., 2003; Alzamora et al., 2005)
- Los productos deshidratados por ósmosis adquieren las propiedades mecánicas (firmeza, dureza) necesarias para permitir un eficiente tratamiento posterior, como secado con aire o congelado (Chiralt & Talens, 2005).

Entre las limitaciones que presenta esta técnica figuran:

- La deshidratación osmótica no es aplicable a todas las frutas. Por ahora solo se emplean las frutas que presentan estructura sólida y pueden cortarse en trozos. Tampoco se recomiendan las frutas que poseen alto número de semillas de tamaño mediano como la mora o guayaba.
- El manejo de los jarabes presenta numerosos inconvenientes. Algunos de estos inconvenientes están relacionados con el almacenamiento de los altos volúmenes que se necesitan, su reutilización; el enturbiamiento que se genera por el desprendimiento de solutos y partículas de las frutas allí sumergidas; el riesgo de contaminación microbiana cuando la concentración ha descendido a niveles inferiores a 60 °Brix, etc.
- Las frutas obtenidas, dependiendo del grado de deshidratación, por lo general no son productos estables, sino semielaborados que pueden complementarse con otras técnicas que podrían encarecer el producto final.

### **3.3 Variables del proceso:**

Existen numerosos estudios experimentales para determinar el efecto de las variables del proceso sobre la transferencia de masa. De estos estudios se han obtenido algunas

relaciones cualitativas de los factores y sus efectos sobre la cinética del proceso y calidad del producto.

**1- Agente osmótico:**

La solución osmótica utilizada debe tener una baja actividad acuosa y buen sabor. Las soluciones concentradas de sacarosa han sido las más comúnmente utilizadas en frutas y el NaCl en vegetales, pescados y carnes, debido al sabor que le imparte al alimento. Otros agentes osmóticos usados son: glucosa, fructosa, lactosa, dextrosa, maltosa, maltodextrinas, polisacáridos, jarabes de maíz de alta fructosa y combinaciones de los mismos. También se realizan pruebas con alcoholes de alto peso molecular como sorbitol, xilitol, maltitol, manitol.

A iguales concentraciones iniciales, cuanto mayor peso molecular tiene el agente osmótico (como en el caso de los polisacáridos) menor es la ganancia de sólidos (difunden poco hacia el interior del tejido) y mayor es la pérdida de agua. Reppa et al. (1999) observaron este efecto al comparar la cinética de deshidratación osmótica de manzanas en solución de glucosa y en solución de sacarosa. El-Aouar et al. (2006) registraron que la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de mamón con solución de sacarosa es notablemente mayor que durante la deshidratación con jarabe de maíz. Cabe aclarar que la actividad acuosa final del producto depende tanto de la pérdida de agua como de la ganancia de sólidos.

La adición de pequeñas cantidades de NaCl a soluciones azucaradas incrementa la fuerza impulsora del proceso de deshidratación debido a la capacidad de esta sal de disminuir la actividad acuosa del medio: se han observado efectos sinérgicos entre el azúcar y la sal (Tonon et al., 2007). En el mencionado trabajo los autores también observaron que un aumento en la concentración de NaCl incrementa la velocidad de ganancia de azúcar, pero a partir de cierta concentración de sal, la velocidad de ganancia de sacarosa disminuye. De acuerdo a Sereno et al. (2001) el cloruro de sodio puede causar cambios estructurales en la membrana celular que podrían incrementar su permeabilidad.

Argandoña et al. (2002) demostraron, durante la deshidratación osmótica de melón, que la adición de ácidos a la solución hipertónica de sacarosa favorece el incremento de sólidos solubles totales, la preservación del color y mejora las propiedades mecánicas.

## **2- Concentración de la solución:**

El intercambio de masa se ve favorecido usando una solución altamente concentrada. La pérdida de agua se incrementa más que la ganancia de sólidos cuando hay un aumento en la concentración de la solución osmótica (Moreira & Sereno, 2003; Uddin et al., 2004; Chenlo et al., 2006; Eren & Kaymak-Ertekin, 2007). Giraldo et al. (2003) estudiaron las condiciones de impregnación de mango y encontraron que la disminución de la concentración de la solución favorece la relación ganancia de soluto/pérdida de agua. Falade et al. (2007) encontraron, en deshidratación de sandías, que el aumento en la concentración de la solución osmótica favorece tanto la pérdida de agua como la ganancia de sacarosa.

En estudios realizados sobre distintos vegetales (Sereno et al., 2001), se encontró que a bajas concentraciones la ganancia de sólidos es mayor que la pérdida de agua (situación de impregnación); incrementando la concentración de la solución, disminuye en la ganancia de sólidos y se torna mucho menor que la pérdida de agua (situación de deshidratación). Los resultados de la relación pérdida de agua/ganancia de soluto tienen estrecha dependencia con la temperatura de trabajo (Lazarides et al., 1997).

## **3- Temperatura:**

La velocidad de la ósmosis está marcadamente afectada por la temperatura. Esta es la variable que más afecta a la cinética de pérdida de agua y de ganancia de sólidos. La pérdida de agua se incrementa con la temperatura, sin embargo la ganancia de sólidos es menos afectada por esta variable del proceso, como ha sido reportado para manzanas (Moreira & Sereno, 2003; Eren & Kaymak-Ertekin, 2007) y para castañas (Chenlo et al., 2006).

Cuando se emplean altas temperaturas el soluto no puede difundir a través de la membrana celular tan fácilmente como el agua y el equilibrio osmótico se alcanza en principio por el flujo de agua desde la célula (se concentran las soluciones internas de las células). Este tipo de equilibrio produce un alimento con menor ganancia de sólidos. Además hay que tener en cuenta que la viscosidad de la solución hipertónica disminuye con la temperatura incrementándose el coeficiente de difusión del agua.

A temperaturas mayores de 45 °C se incrementa la velocidad de transferencia de masa al mismo tiempo que pueden tener lugar reacciones de pardeamiento y deterioro del aroma.

Altas temperaturas, mayores de 60 °C, modifican las características del tejido favoreciendo el fenómeno de impregnación y de este modo la ganancia de sólidos. Falade et al. (2007) estudiaron la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de sandía y encontraron que el incremento de los valores de concentración y temperaturas de la solución provocan un aumento en el flujo de agua y de soluto.

Los tratamientos a altas temperaturas y cortos tiempos (HTST), 80-85 °C por uno a tres minutos, combinan el efecto osmótico con inactivación enzimática y, además, remueven parte del aire de los espacios intercelulares.

La temperatura óptima del procesamiento depende del alimento. Algunos autores han observado en diferentes vegetales que en la medida que se incrementa la temperatura, se acelera la pérdida de agua sin mayores cambios en la ganancia de azúcar (Serenó et al., 2001; Tonon et al., 2007). Esto se suele atribuir al efecto antagónico de dos corrientes: la penetración del azúcar por difusión y el transporte de azúcar fuera del alimento debido al arrastre del flujo de agua, que depende de la velocidad de flujo de agua.

#### **4- Naturaleza y propiedades fisicoquímicas del material alimenticio:**

La composición química (proteínas, carbohidratos, sales, grasas, etc.), la estructura física (porosidad, tipo y arreglo de las células, orientación de las fibras, etc.) y los pretratamientos pueden afectar la cinética de la ósmosis en los alimentos.

La complejidad de la estructura y la variabilidad de la respuesta fisiológica del tejido vegetal ante el proceso osmótico plantean dificultades al modelar la cinética y predecir los cambios físicos y químicos inducidos en el producto durante la ósmosis (Chiralt & Talens, 2005).

La pérdida de la integridad de la membrana celular debido al calentamiento (pretratamiento) puede disminuir grandemente la concentración por ósmosis en las frutas (Serenó et al., 2001; Lazarides et al., 1997).

#### **5- Agitación de la solución osmótica:**

La velocidad de deshidratación osmótica puede aumentarse mediante la agitación del fluido, en tanto que la ganancia de sólidos se ve menos afectada por esta variable de operación (Moreira & Sereno, 2003). Tonon et al. (2007) demostraron, utilizando el número de Reynolds para cuantificar la agitación, que las muestras de tomate sometidas a

régimen turbulento presentan mayor pérdida de agua que aquellas deshidratadas en régimen laminar, en tanto que la ganancia de soluto se vio poco afectada por la velocidad de agitación.

En algunos casos el incremento en la velocidad de deshidratación es tan pequeño que puede ser más económico no utilizar agitación. En algunos rangos de temperatura, se encontró que la velocidad de agitación favorece la pérdida de agua y disminuye la ganancia de sacarosa (Tonon et al., 2007).

#### **6- Geometría del material:**

El proceso de deshidratación osmótica depende de la geometría del material a deshidratar, esto es, depende de la relación área superficial por unidad de volumen y de la longitud de difusión es decir del espacio que deben recorrer el agua y los solutos involucrados en el transporte de masa.

Se encontró que la ganancia de sólidos se incrementa con el área superficial y disminuye cuando la longitud de difusión se incrementa (Sablani & Rahman, 2003), mientras que la pérdida de agua pasa por un máximo (dependiendo de la forma) y luego disminuye. Esta disminución de la pérdida de agua podría deberse a una reducción de la difusión causada por una alta ganancia de sólidos en la superficie con formación de una capa de solutos.

O sea que para las mismas condiciones de operación, fruta fresca con diferentes tamaños y formas pueden dar productos finales con muy diferentes características (Sablani & Rahman, 2003).

#### **7- Presión de operación:**

La presión de operación es otro parámetro a tener en cuenta. El vacío en la deshidratación osmótica produce cambios en el mecanismo de transferencia de masa. El proceso bajo vacío intensifica el flujo capilar y el total de agua transferido resulta de una combinación de difusión tradicional y flujo por capilaridad, y es grandemente afectada por la porosidad de la fruta. Se ha observado que la ganancia de soluto, en el proceso osmótico, se ve favorecida con el uso de bajas presiones (Fito, 1994).

La transferencia de masa durante la deshidratación osmótica con vacío ha sido descrita utilizando diferentes modelos: a través de la aproximación clásica de transferencia osmótica de masa (Rastogi & Raghavarao, 1995); mediante soluciones empíricas (Corzo et al.,

2007); aplicando las soluciones analíticas de la Ley de Fick o expresiones simplificadas de las mismas (Shi et al., 1995; Giraldo et al., 2003).

A pesar del buen ajuste de estos modelos a los datos experimentales, es difícil explicar el efecto que el vacío ejerce sobre la transferencia de masa con mecanismos difusionales clásicos solamente (osmótico y difusional), por lo que se ha propuesto un nuevo mecanismo, el hidrodinámico (MHD) que está relacionado con la microestructura porosa de los alimentos y cuya fuerza impulsora son los gradientes de presión (por capilaridad y/o impuesta) que provocan una penetración de la solución osmótica dentro de los poros de la fruta mayor que a presión atmosférica (Shi & Fito, 1994; Chiralt et al., 2001), favoreciendo de esta manera la ósmosis debido al incremento de la superficie de contacto entre la fruta y la solución.

Se ha propuesto una nueva modalidad para llevar a cabo la deshidratación osmótica al vacío, cual es llamada la deshidratación osmótica al vacío pulsante (DOV-P) en la que se aplican a la fruta cortos tiempos de vacío con períodos de exposición a presión atmosférica. Esta alternativa conduce a menor gasto energético, por lo que está siendo muy estudiada actualmente. Analizando la ganancia de azúcar, los mayores valores de ganancia de azúcar se encontraron trabajando con vacío pulsante (Barat et al., 2002) respecto de los resultados obtenidos con vacío y con presión atmosférica. No obstante, en estudios realizados con otras frutas los resultados de la relación de ganancia de solutos y pérdida de agua no siempre coinciden y están fuertemente afectados por la temperatura del proceso y la naturaleza del producto (Shi et al., 1995).

Por otra parte, el uso de altas presiones ha sido incorporado recientemente por la industria alimenticia, puesto que ofrece un gran potencial para producir alimentos microbiológicamente seguros, con mínimo cambio a sus características organolépticas naturales. Las altas presiones pueden también ser utilizadas como un tratamiento previo para acelerar el transporte difusivo dentro de los alimentos durante pasos subsecuentes del proceso. Por ejemplo, Rastogi & Niranjana (1998) incrementaron la velocidad de transferencia total durante la deshidratación osmótica de ananá aplicando un pre-tratamiento de alta presión en el rango de 100 a 700 MPa. Este incremento en la velocidad de transporte de masa se atribuyó a ruptura de las paredes celulares. Eshtiaghi et al. (1994) aplicaron deshidratación osmótica con alta presión como una etapa previa a la congelación

de arvejas, zanahorias y papas y compararon los resultados obtenidos con otros pre-tratamientos de deshidratación. Un importante efecto observado fue que los vegetales deshidratados con alta presión exhibían una baja capacidad de rehidratación, lo que también se atribuyó al daño en la estructura celular debido a la aplicación de alta presión.

Un trabajo reciente (Sopanankul et al., 2002) sugiere que las altas presiones se pueden utilizar para acelerar el movimiento de ingredientes, por ejemplo azúcares, sales y ácidos, en productos alimenticios. Sin embargo estos autores demostraron, mediante la difusión de sacarosa en cilindros de papas, que esto se puede llevar a cabo por debajo de una presión óptima sobre la cual procesos tales como la gelatinización del almidón pueden predominar y obstaculizar la difusión. En este estudio, el coeficiente de difusión observado para la sacarosa (con alta presión) se incrementó de tres a ocho veces respecto al valor obtenido a presión ambiente.

### **3.4 Modelos matemáticos que describen el proceso de deshidratación osmótica**

Para desarrollar un modelo fenomenológico que describa la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica se deberían conocer los fundamentos relacionados con la física y la termodinámica del sistema, como así también los mecanismos y la cinética de transferencia de masa.

La alta complejidad del sistema hace que la precisión predictiva sea difícil cuando se aplican modelos matemáticos rigurosos. Esto ha llevado a que en muchos casos se interprete la información experimental bajo esquemas empíricos o semiempíricos que son válidos solamente para reproducir condiciones semejantes a las del trabajo del cual se obtuvieron.

Generalmente cuando se quiere aplicar un modelo fenomenológico para describir la deshidratación osmótica, se emplea el modelo de Crank.

Se han desarrollado diferentes modelos matemáticos para describir este proceso, los que pueden ser clasificados en tres grandes grupos:

- *el modelado de sólidos porosos homogéneos*, en el cual se supone que el tejido es homogéneo, los flujos individuales son independientes y pueden aplicarse las leyes de difusión en sólidos porosos homogéneos. De este modo se ha aplicado la segunda Ley de Fick para estimar la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en

función del tiempo en la deshidratación osmótica de diferentes productos alimenticios (Azura et al., 1992; Rastogi et al., 1997; Lazarides et al., 1997; Rastogi & Niranjana, 1998), que en el caso de difusión en una sola dirección toma la forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (I.5)$$

La solución analítica de esta ecuación diferencial está limitada a geometrías regulares simples y tiene la forma de una serie infinita dependiente del tiempo, de la cual suele emplearse sólo el primer término. Para el sencillo caso de una placa plana con concentración constante de soluto y/o agua en la superficie ( $C_e$ ) dicha solución adopta la forma:

$$\frac{C - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-D_{ef} (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t\right\} \quad (I.6)$$

Los factores que alejan al proceso de la idealidad (como la interacción de los flujos, la heterogeneidad del material, variación de volumen, resistencia transmembrana, etc.) se engloban en un coeficiente de difusión efectivo obtenido como parámetro de ajuste de los datos experimentales.

Este es el modelo fenomenológico más ampliamente utilizado para describir la transferencia de agua y soluto durante la deshidratación osmótica. Existen datos de coeficientes de difusión efectivos para distintos productos: ananá (Rastogi & Niranjana, 1998), banana (Waliszewski et al., 1997), manzana (Lazarides et al., 1997), etc. Con los resultados obtenidos pueden estimarse los contenidos medios de agua y de sólidos solubles a diferentes tiempos de deshidratación.

Las limitaciones del modelo de difusión de Fick para propósitos prácticos son: se supone un cuerpo semi-infinito para garantizar transferencia de masa unidireccional; se supone que la concentración de la solución osmótica permanece constante, por lo cual se requiere una relación solución/alimento muy grande; aunque el modelo tiene en cuenta la forma y las dimensiones, solo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas, por lo cual se requiere de la aplicación de técnicas numéricas para materiales de geometría irregular; los

valores de concentración al equilibrio deben determinarse experimentalmente; no considera el efecto de la posible interacción entre los flujos de agua y de soluto (ambos se resuelven de modo independiente); se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa, que en algunos alimentos es muy importante.

Hought et al. (1993), en un trabajo de deshidratación osmótica de manzanas, desarrollaron un modelo sencillo aunque innovador basado en la ley de Fick donde consideraron los flujos difusivos de agua y azúcar por separado, aunque vinculados a través de la fracción en peso de los mismos; también se consideró la variación de volumen de las rodajas de manzana durante el procesamiento. Este modelo permite predecir las variaciones de humedad y de soluto en función del tiempo.

En un trabajo previo (Ramallo, 2001) se analizó la aplicación de diferentes modelos sencillos basados en la solución analítica de la ley de Fick para estimar los coeficientes de difusión de agua y soluto durante la deshidratación osmótica de rodajas de ananá en solución de sacarosa. Estos modelos difieren entre sí en la consideración del encogimiento durante el proceso versus espesor constante y en el número de términos de la serie solución. El modelo que considera la contracción de la fruta durante la deshidratación y aplica los tres primeros términos de la solución analítica es el que mejor se aproxima (menor valor del error promedio porcentual de la estimación) a los resultados experimentales del contenido de humedad y de sacarosa.

- *el modelado microscópico estructural y de termodinámica irreversible*, en el cual se tiene en cuenta la estructura celular: desde el punto de vista del transporte las células son consideradas sistemas multi-fases, siendo las fases más importantes el citoplasma, la vacuola, la pared celular y los espacios intercelulares (Gekas, 1992). Comparado con la aproximación de sólidos porosos homogéneos, el modelado microscópico estructural es más complicado pero también más preciso. Los modelos de termodinámica irreversible y transporte en microestructuras incorporan el encogimiento del tejido; el flujo en los espacios intercelulares y el flujo transmembrana son tratados en forma separada, pero acoplada (despreciando la posible resistencia de la pared celular), permitiendo así una mejor comprensión

del fenómeno (Marcotte et al., 1991). Este enfoque del problema posee una importante limitación: requiere el conocimiento de un gran número de parámetros físicos y biológicos, que no siempre están disponibles.

Existen en este campo modelos con diferentes grados de complejidad. Algunos de ellos pueden aplicarse a determinados productos y en determinadas condiciones de deshidratación; los más elaborados requieren del conocimiento de un número muy grande de parámetros para resolver las ecuaciones involucradas. Se encuentran en la bibliografía trabajos que presentan el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos del tipo microscópico estructural de deshidratación de manzanas y papas, principalmente (Marcotte et al., 1991; Spiazzi & Mascheroni, 1997). Estos modelos mecanísticos son muy elaborados y describen la complejidad del proceso permitiendo predecir los perfiles de concentración de soluto y de agua en el tejido celular como función del tiempo y del espacio, suministran información acerca del flujo transmembrana y el comportamiento del encogimiento del tejido (Yao & Le Maguer, 1997). Sin embargo su validación no siempre es factible, por la cantidad de variables involucradas.

- *El modelado empírico y semi-empírico*, estos modelos usualmente no tienen en cuenta las dimensiones ni la estructura del material. Dentro de este grupo podemos mencionar el **modelo de Azuara** que simula la pérdida de agua y la ganancia de sólidos a partir de los balances de masa, obteniendo ecuaciones que requieren dos parámetros ajustables (Azuara et al., 1992, Azuara et al., 1998). Estas ecuaciones han sido utilizadas por numerosos investigadores (Kaymak-Ertekin & Sultanoglu, 2000; Parjoko et al., 1996). La principal ventaja del modelo de Azuara es que no se requiere llegar al equilibrio para predecirlo. Su gran desventaja es su validez, ya que se limita al rango experimental para el cual se obtuvieron los parámetros.

El **modelo de Biswal y Bozorgmehr** (Biswal & Bozorgmehr, 1992) trata la pérdida de agua y ganancia de soluto en función de la composición de la solución osmótica, temperatura y tiempo de contacto. El modelo es sencillo de aplicar pero solo es válido para una disolución osmótica formada por agua, sacarosa y cloruro de sodio en un rango de temperatura entre 20 y 50 °C.

El **modelo de Palou** (Palou et al., 1994) está basado en la ecuación de Peleg, la cual genera dos constantes empíricas. Este modelo es similar al modelo de Azuara: se basa en el ajuste de los datos experimentales a una ecuación y no se requiere llegar al equilibrio para predecirlo, pero su validez se limita al rango experimental para el que se obtuvieron los parámetros.

El **modelo de Hawkes y Flink** (1978) también genera dos constante cinéticas empíricas, pero a las cuales se les puede asignar un significado físico: una está asociada a la velocidad de transferencia de agua y solutos por mecanismos osmo-difusionales y la otra a la transferencia en procesos muy cortos debido a las diferencias de presión. Este modelo es válido para las primeras etapas de deshidratación o tiempos cortos. Ha sido aplicado con éxito por otros autores; por ejemplo Moreira & Sereno (2003) y Reppa et al. (1999) emplearon este modelo para explicar la cinética de deshidratación en manzanas.

El **modelo de Panagiotou** (Panagiotou et al., 1999) supone que la pérdida de agua y la ganancia de sólidos dependen de la concentración de la solución, la temperatura, el tiempo de inmersión, la velocidad de agitación y el tamaño de la muestra, de acuerdo a un modelo empírico basado en una ecuación cinética de primer orden, con lo cual obtiene una serie de ecuaciones no lineales con sus respectivos parámetros o variables a cuantificar.

**Modelos de ajuste polinómico.** Existen otros numerosos trabajos que proponen modelos estadísticos o empíricos para evaluar el efecto de las variables del proceso sobre la cinética de transferencia de agua y soluto, a partir del análisis de regresión. Los ajustes polinómicos son modelos empíricos sencillos, válidos solamente para las condiciones experimentales a partir de las que se obtuvo el modelo. Los parámetros no tienen significado físico. Así, Castro et al. (1998a,b) estudiaron la influencia de diferentes variables (temperatura, presión de operación, concentración y otros) sobre la cinética de ganancia de sólidos, pérdida de agua y eficiencia del proceso a través de ecuaciones polinómicas resultantes del análisis estadístico de superficie de respuesta.

Analizando estas formas de plantear el problema (modelado de sólidos porosos homogéneos, modelado empírico y modelado microscópico estructural) se encuentra que la Ley de Fick resuelta de acuerdo a Crank (1975) (considerando al medio como un sólido poroso homogéneo con propiedades constantes), en la mayoría de los casos, se ajusta bien a los resultados de las experiencias de deshidratación osmótica en lo que respecta a los contenidos promedio de agua y de azúcar (o sal) en función del tiempo. Los coeficientes de difusión efectivos del agua  $D_{wef}$  y del soluto  $D_{sef}$  obtenidos de este modo son valores "globales" que minimizan los errores pero que tienen poca posibilidad de ser los verdaderos ya que engloban en sí varios fenómenos: resistencia transmembrana, variación del volumen, interacción entre los flujos, heterogeneidad del sólido, etc., por lo que, posiblemente, no sean apropiados para predecir el perfil interno del contenido de humedad y de azúcares que se genera en el alimento durante este proceso. Este perfil puede ser muy importante cuando el alimento deshidratado osmóticamente se conserve por congelación; un alto contenido de humedad en el interior puede generar la formación de grandes cristales de hielo que derivan en ruptura de las paredes celulares y posterior exudado, con disminución de la calidad del producto final. Por otra parte, la aplicación de los modelos microscópicos estructurales permite estimar coeficientes de difusión más realistas, puesto que aísla los diferentes factores que afectan el movimiento del agua y del soluto dentro del sólido; pero estos modelos tienen la desventaja de precisar del conocimiento de un número tan grande de parámetros para su aplicación que su uso queda restringido a unos pocos productos alimenticios. Aún en los modelos que plantean la deshidratación osmótica desde el punto de vista microscópico estructural se requiere de algunas simplificaciones como, por ejemplo, respecto de la forma de las células, considerar encogimiento uniforme, etc. Generalmente se designa una forma y tamaño para todas las células del producto a deshidratar; en algunos vegetales esto es aproximadamente cierto (como en papas y manzanas), pero en otros, como en el ananá, la uniformidad de tamaño y forma de las células dista bastante de la realidad. El ananá está formado por un grupo de pequeñas frutas individuales (ojos) y como dentro de cada fruta existen células con funciones diversas (algunas de ellas están preparadas para impedir la pérdida de humedad y otras para transferirla) es difícil asignar un único valor al flujo transmembrana y se requiere aquí de otra importante simplificación.

Por estas razones, entre otras, cuando el planteo de un modelo que pretende describir el fenómeno físico, como es el caso del modelado microscópico estructural, requiere de un gran número de simplificaciones en sus parámetros, lo alejan de tal modo del proceso físico real que se incurre en el campo de las suposiciones y los errores quizá en la misma medida que la aplicación del sencillo modelo de difusión en sólidos porosos homogéneos de Fick.

### **3.5 Limitaciones de la Deshidratación osmótica**

Todavía hay algunas limitaciones para llevar a escala industrial la tecnología de deshidratación osmótica. La alta viscosidad de la solución osmótica y la diferencia de densidad entre el sólido (baja) y la solución son las principales desventajas. Un aumento en viscosidad incrementa resistencia a la transferencia total de masa pues el coeficiente de difusión es inversamente proporcional a la viscosidad del sistema. Por otra parte, la naturaleza frágil de los alimentos no permitiría un aumento de la agitación suficiente como para superar el efecto de la viscosidad. La diferencia de densidad hace que el producto flote y se requiere de medios mecánicos adicionales para mantenerlo sumergido en la solución.

La principal barrera para la implementación industrial de la deshidratación osmótica es el costo de la solución osmótica, lo que hace necesario desarrollar medios apropiados para su reciclaje. Durante la deshidratación osmótica, una cantidad grande de agua se transfiere del alimento a la solución osmótica que da lugar a una dilución de la solución osmótica, un aumento de la masa de la solución así como una disminución del potencial de desecación. Los otros componentes tales como aromas, pigmentos, ácidos, pectina, vitaminas, sales, lípidos, proteínas, fragmentos de la pulpa y proteína se lixivian en la solución, que conduce a cambios químicos, fisicoquímicos y sensoriales del producto en la solución después de la utilización. Por otro lado, el reciclaje del jarabe da lugar a cambio de color (del jarabe) después de varias aplicaciones.

Estos costos se pueden reducir al mínimo reciclando la solución osmótica, pero se debe prestar especial cuidado de modo que la calidad del producto no se altere. La solución osmótica tiene que ser concentrada para ser reciclada, lo que se puede conseguir con la concentración por la evaporación y/o por la adición del soluto. Los pasos del proceso implicados en el reciclaje de la solución osmótica todavía siguen siendo propiedad de patentes.

Normalmente, la concentración de la solución es realizada por evaporación y/o adición del soluto. Los procesos convencionales de membrana tales como ósmosis reversa tienen limitaciones después de alcanzar un punto (aproximadamente 30°Brix) debido a la alta presión osmótica a esta concentración. Nuevamente, un proceso osmótico de membrana parece ser prometedor puesto que no implica cambios de fase, a diferencia de la evaporación.

El desarrollo industrial en gran escala del proceso de deshidratación osmótica está limitado debido a los problemas encontrados en la finalidad-aplicabilidad de la solución osmótica usada. Asimismo, la viabilidad económica de cualquier proceso que involucre la deshidratación osmótica como una etapa de pre-tratamiento depende tanto del costo del agente osmótico así como de la disponibilidad de la solución osmótica y de la posibilidad de aplicación del jarabe usado a un proceso económicamente factible, por ejemplo aplicado en jarabes para la fruta en conserva, mezclándose con los zumos de fruta, uso como bebida carbonatada con sabor a fruta, uso como solución de cubierta en el enlatado así como para la producción de saborizantes naturales.

## **4. CONGELACION.**

### **4.1 Fundamentos de congelación**

La congelación es uno de los mejores métodos de preservación de frutas durante el almacenamiento por tiempos prolongados. La congelación preserva color, sabor y valor nutritivo de la mayoría de las frutas debido a que reduce la velocidad de las reacciones de degradación e inhibe la actividad microbiana (Sun, 2006).

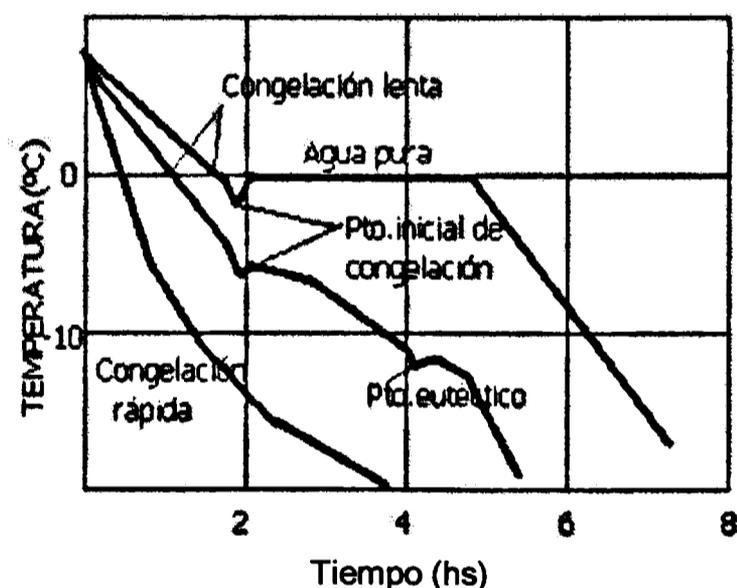
La calidad de las frutas congeladas depende de varios factores tales como el tipo de fruta, el grado de madurez de la misma, pre-tratamientos, tipo de envase y velocidad de congelación. Un adecuado proceso de congelación y almacenamiento puede preservar el producto en óptimas condiciones por un año o más. Las frutas pueden ser congeladas en diferentes formas (cubos, láminas, cilindros, etc) y con algún pre-tratamiento (con o sin adición de azúcar, parcialmente deshidratadas).

El fundamento de la congelación es la solidificación del agua durante el proceso, lo que provoca una disminución en la cantidad de agua libre, generando una alta concentración de sólidos solubles.

El agua es el principal componente de los alimentos, en las frutas constituye el 85-90 % de su composición. Desde el punto de vista físico, el tejido vegetal puede ser considerado como una solución acuosa diluida. La cristalización del agua durante la congelación reduce la actividad del agua en estos tejidos y consecuentemente produce una disminución de las reacciones químicas y bioquímicas y del crecimiento microbiano. Además, debido a que la congelación involucra el uso de bajas temperaturas, las reacciones químicas también disminuyen su velocidad en la medida que se reduce la temperatura.

### Curvas de congelación de vegetales

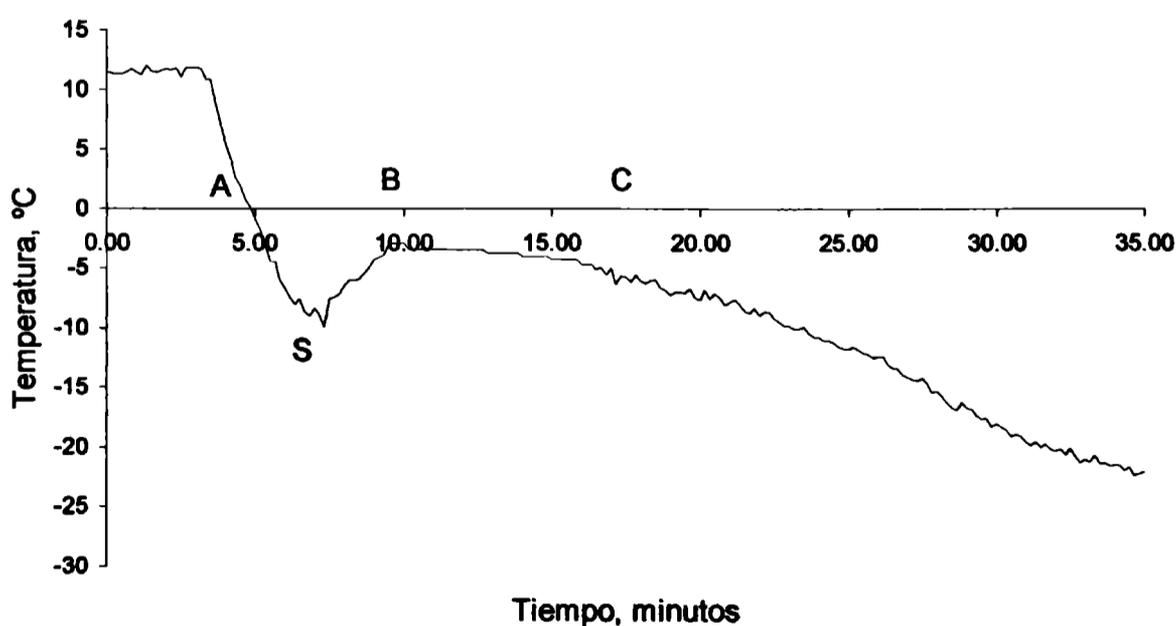
La curva de congelación representa gráficamente el curso típico del proceso de congelación de alimentos. El diagrama varía según la influencia de los siguientes factores: método de congelación, tamaño, forma, composición química y propiedades físicas del producto, y tipo de envasado (o ausencia de éste).



**Figura 1.7:** visión esquemática de la congelación de una sustancia pura (agua) y de un alimento a dos velocidades de congelación.

La Figura 1.7 muestra curvas típicas de congelación de productos vegetales a diferentes velocidades de congelación. Cuando el producto se enfría por debajo de la temperatura de inicio de congelación comienza a formarse hielo (sección A-S de la Figura 1.8). La temperatura a la cual comienzan a formarse los primeros cristales de hielo depende del tipo

de producto y está relacionada a la composición y concentración de los compuestos más que al contenido de agua. En las frutas la formación de hielo tiene lugar después que el producto alcanza temperatura por debajo de su punto de congelación por un corto tiempo; este fenómeno es conocido como sub-enfriamiento (punto S en la Figura 1.8). La sección B-C de la Figura 1.8 corresponde al congelamiento del agua del alimento a temperatura prácticamente constante; la pendiente negativa indica que la temperatura disminuye en la medida que se incrementa la concentración de solutos. Este incremento en la concentración de solutos en la medida que progresa la congelación provoca cambios importantes en las propiedades físicas y químicas de la porción aún no congelada. Una disminución de la duración de la sección B-C mejora la calidad de la fruta congelada. En consecuencia, se puede decir que un aumento en la velocidad de congelación garantiza una mejor calidad del producto congelado. La sección C-D corresponde al enfriamiento del producto congelado hasta la temperatura de almacenamiento, con un importante incremento en la concentración de solutos en la porción no congelada. Esta etapa se denomina período de templado, una vez alcanzada la conversión total de agua en hielo nuevamente se inicia un gradual y permanente descenso de la temperatura. Este comportamiento ideal se cumple estrictamente en agua pura pero en la mayoría de los alimentos este comportamiento no es tan claro, ya que la conversión de parte del agua en hielo implica un incremento en la concentración de diversas sales en el agua líquida remanente, consecuentemente se produce un descenso en el punto de congelación.



**Figura 1.8.** Historia térmica del centro de una placa plana de ananá de 0.6 cm de espesor durante el proceso de congelación

La presencia simultánea de hielo y el incremento en la concentración de solutos afecta el tejido de la fruta. La concentración de soluto se incrementa en la medida que progresa la congelación y, en consecuencia, la alta concentración de solutos en la matriz no congelada puede causar la deshidratación de las células. Algunas sustancias crioprotectoras como los azúcares suelen adicionarse para minimizar el daño celular.

Para obtener el efecto conservador deseado, reducir reacciones no deseables y mantener en este estado el producto durante el almacenamiento, de manera que se reduzcan las modificaciones físicas, químicas y microbiológicas, es indispensable determinar con exactitud los tratamientos anteriores a la congelación, la velocidad óptima de congelación, el tipo de embalaje, la temperatura de almacenamiento y la velocidad de descongelación.

#### **4.2 Aspectos físicos de la congelación**

##### **- Formación de hielo**

En alimentos que son enfriados bajo los 0 °C se comienza a formar hielo a la temperatura crioscópica (comienzo de la congelación), que es también la temperatura característica de fusión, es decir, temperatura a la cual se funde el último cristal de hielo en una descongelación suficientemente lenta. El comienzo de la congelación depende en gran medida del tipo y de la concentración de las sustancias disueltas y no solamente de su contenido en agua.

##### **- Cristalización del hielo**

Una vez que el agua ha comenzado a congelarse, la cristalización es función de la velocidad de enfriamiento, al mismo tiempo que de la difusión del agua a partir de las disoluciones o geles en contacto con la superficie de los cristales de hielo. Si la velocidad de congelación es lenta, los núcleos de cristalización serán muy pocos por lo que los cristales de hielo crecen ampliamente, los que pueden provocar un rompimiento de las células, ya que éstas están sometidas a una presión osmótica positiva y pierden agua por difusión a través de las membranas plasmáticas, en consecuencia, colapsan ya sea parcial o totalmente. Mientras que si la velocidad de congelación es mayor, el número de cristales aumenta y su tamaño disminuye, parte de ellos se formarán en el interior de las células, evitando de esta manera el gran daño en el producto.

En resumen una congelación muy lenta puede llevar a un excesivo exudado en la descongelación, mientras que una congelación rápida permite preservar mejor la textura de ciertos productos, como las frutas.

**- Cambios dimensionales**

La congelación del agua se ve acompañada de un aumento de volumen, el que en alimentos vegetales es de un 6 % a un 10 % aproximadamente. En el diseño de equipos se debe considerar esta dilatación.

**- Conductividad térmica**

La conductividad térmica del hielo es cuatro veces mayor que la del agua. Este factor juega un papel importante en la rapidez de congelación. La conductividad térmica varía mucho según los productos y según la temperatura, dependiendo de la orientación estructural de los tejidos.

**- Tiempos de congelación**

El tiempo real que dura el proceso de congelación va a depender de diferentes factores, ya sean relativos al producto como al equipo utilizado:

- a. Temperaturas inicial y final del alimento
- b. Temperatura del refrigerante
- c. Coeficiente de transferencia de calor producto-medio de enfriamiento
- d. Variación de entalpía del producto
- e. Conductividad térmica del producto

**4.3 Aspectos bioquímicos de la congelación de productos de origen vegetal**

**- Composición química en relación con la estructura**

El aumento de volumen debido a la formación de hielo es el primer factor que produce daño mecánico a la célula, afectando la integridad de la membrana celular.

Tanto frutas como hortalizas están constituidas por células muy unidas entre sí, con pequeños espacios intercelulares. La congelación destruye la integridad celular; en la descongelación las membranas de las células muertas se vuelven muy permeables. En esta última etapa el exudado comienza a difundir (azúcares, pigmentos, sales, etc.), reduciendo así el valor alimenticio.

### **- Cambios en el color**

Los principales mecanismos promotores de modificaciones del color durante la congelación son:

- ruptura del cloroplasto celular
- cambios en los pigmentos naturales (clorofilas, carotenos y antocianinas)
- desarrollo de pardeamiento enzimático u oxidativo

La formación de cristales de hielo puede causar daño mecánico en el tejido y puede desintegrar la frágil membrana de cloroplastos y cromoplastos, liberando clorofila y carotenos y facilitando su oxidación o pardeamiento enzimático. El congelamiento y almacenamiento congelado de frutas y hortalizas causa pérdida de color verde debido a la degradación de las clorofilas (a y b) y transformación en feofitinas, lo cual genera tonos pardos en el producto.

Durante el almacenamiento en estado congelado no se producen pérdidas importantes de pigmentos, aunque podría ocurrir alguna reacción de degradación de carotenos por isomerización de los mismos. Sin embargo, en algunas frutas se forman de pigmentos pardos debido a reacciones de oxidación enzimática de precursores fenólicos incoloros. La congelación no inactiva las enzimas por lo que puede ser necesaria la aplicación de un tratamiento térmico previo (escaldado) para evitar estos cambios de color.

### **- Modificación del aroma (flavour)**

El proceso de congelación no altera marcadamente el aroma de las frutas, salvo si la operación dura un tiempo muy prolongado. En un almacenamiento muy prolongado la primera modificación es la pérdida de aroma característico de la fruta fresca, también pueden desarrollarse aromas desagradables.

En el caso de las hortalizas, éstas deben ser escaldadas para inactivar las enzimas responsables de la formación de aromas desagradables y conservar así su aroma característico.

### **- Modificación de la textura**

Hay ciertas frutas que están propensas a cambios en la textura en la descongelación, lo que se puede deber a modificaciones de las paredes celulares por causa de diversos procesos físicos y fisicoquímicos durante la congelación.

#### **4.4 Métodos de congelación**

La velocidad del proceso de congelación y la formación de pequeños cristales de hielo son factores críticos para reducir el daño del tejido y las pérdidas por exudado durante la descongelación de las frutas.

Diferentes tipos de sistemas de congelación han sido diseñados para alimentos. La selección del sistema de congelación apropiado depende del tipo de producto, de la calidad deseada para el producto final, el volumen de producción y, principalmente, de las condiciones económicas.

Los sistemas de congelación se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes métodos o mediante una combinación de éstos:

- a) Inmersión
- b) Contacto indirecto
- c) Corriente de aire
- d) Criogénico

##### **a) Por inmersión:**

Se introduce el producto en una solución a bajas temperaturas (puede usarse NaCl o azúcares, glicerol o soluciones de alcohol).

Esta solución es un buen conductor del calor, hace contacto con todo el producto, provocando una transferencia de calor rápida y el producto es congelado totalmente en corto tiempo (se congela en unidades individuales en vez de forma masiva).

Una desventaja importante es la extracción de los jugos del producto por diferencia de concentración. También puede existir una penetración excesiva de sal en el producto, provocando cambio de sabor (si se usa solución de azúcar en frutas, es favorable).

##### **b) Congelamiento por contacto indirecto:**

Por lo general el producto se coloca encima de placas metálicas a través de las cuales circula un refrigerante. La transferencia de calor es principalmente por conducción debido a lo cual la eficiencia del congelador depende de la cantidad de superficie de contacto. Este método es muy útil en la congelación de productos de formas regulares y en pequeñas cantidades.

**c) Congelamiento por corriente de aire:**

Se usa el efecto combinado de temperaturas bajas y velocidad del aire alta, lo que produce una alta transferencia de calor del producto.

En general se debe tener la consideración que el aire pueda circular libremente alrededor de todas las partes del producto.

**d) Congelamiento criogénico:**

El alimento se congela por contacto directo con gases licuados, nitrógeno o dióxido de carbono. El nitrógeno, a presión atmosférica, hierve a  $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura que alcanza la superficie del alimento es inferior a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La alta velocidad de formación de cristales de hielo reduce el daño causado por ruptura celular, preservando las características sensoriales y nutricionales de la fruta. Este método es apropiado para fruta trozada de tamaño pequeño.

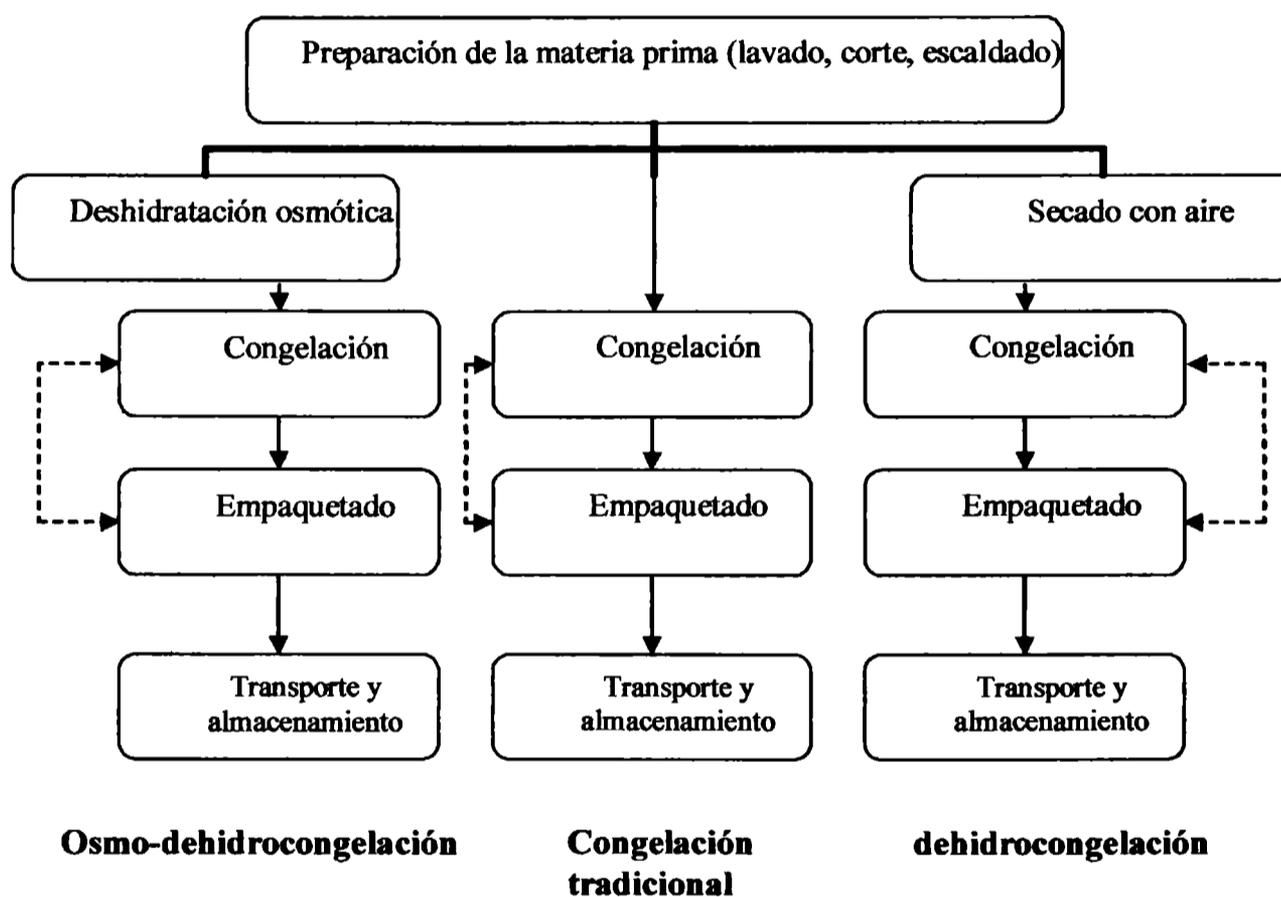
#### **4.5 Dehidrocongelación**

Las frutas y hortalizas tienen un alto contenido de agua (entre el 75 y el 95 %) y poseen paredes celulares poco elásticas, lo cual los hace susceptibles de sufrir daño por formación de grandes cristales de hielo durante la congelación. Aún cuando se reduce la posibilidad de formación de grandes cristales de hielo con el incremento de la velocidad de congelación, el daño del tejido vegetal es inevitable debido a la presencia de gran cantidad de agua. La dehidrocongelación proporciona una manera prometedora de preservar frutas y hortalizas quitando parte de agua del material previo a la congelación (Robbers et al., 1997; Giannakourou & Taoukis, 2003a,b). En realidad, la deshidratación parcial puede visualizarse como un proceso de concentración de solutos, ya que solo se retira parte del agua libre presente en el tejido, cuidando que la estructura celular sufra el mínimo daño; consecuentemente, la actividad acuosa continúa siendo alta. Por la misma razón el proceso de deshidratación parcial por si solo no es un método de preservación que garantice una larga vida de almacenamiento y debe complementarse con algún otro proceso, como la congelación.

Dehidrocongelación es un método comercialmente establecido que permite reducir costos de congelación, almacenamiento y transporte de alimentos vegetales. Durante la dehidrocongelación el alimento es deshidratado hasta un contenido de agua requerido y

luego es congelado (Robbers et al., 1997; Spiazzi et al., 1998; Maestrelli et al., 2001; Sun, 2006). Por lo cual la deshidratación parcial constituye la primera etapa del proceso de dehidrocongelación, afectando tanto el proceso de congelación como la calidad del producto final.

El secado con aire y la deshidratación osmótica son metodologías ampliamente utilizadas para quitar el agua de tejidos vegetales. Los pasos a seguir durante la congelación y la dehidrocongelación -por deshidratación osmótica o por aire caliente- son similares, como se muestra en la Figura I.9.



**Figura I.9:** Etapas básicas de los procesos de congelación de frutas y hortalizas

Como tratamiento previo al congelado de frutas ha tenido más éxito la deshidratación osmótica por dos cuestiones fundamentales: no requiere el uso de energía y preserva mejor las características sensoriales de las frutas. Sin embargo, se debe tener especial cuidado al elegir la solución acuosa de alta presión osmótica, puesto que la impregnación de soluto puede conducir a modificaciones substanciales en la composición con un impacto negativo en características sensoriales.

Cuando se utiliza el secado parcial con aire caliente es importante hacer un estudio específico para cada producto, para evitar que se genere una costra deshidratada en la superficie y los consecuentes cambios negativos de aspecto, textura y color en la fruta

La disminución de humedad del tejido vegetal reduce la cantidad de agua a ser congelada, disminuyendo así la carga de refrigeración necesaria para efectuar el proceso de congelación o, desde otro punto de vista, el tiempo de residencia en el equipo congelador (Spiazzi et al., 1998). En consecuencia, los productos dehidrocongelados podrían disminuir los costos de equipos, energía, envase, distribución y almacenamiento, y mantener la calidad del producto comparable a la del producto convencional (Biswal et al., 1991).

Kiwi fresco y parcialmente deshidratado durante 3 h en solución de sacarosa de 68 °Brix se congelaron en un congelador con corriente de aire de 3 m/s a -30 °C (Spiazzi et al., 1998). Los autores observaron que el proceso de congelación de las muestras de fruta parcialmente deshidratada tuvo una velocidad de aproximadamente un 20–30 % mayor que las muestras de kiwi sin deshidratar.

Se han publicado exitosas aplicaciones de dehidrocongelación de frutas y hortalizas. Diferentes autores coinciden al demostrar que un proceso de deshidratación osmótica previo a la congelación disminuye sustancialmente la cantidad exudado. Maestrelli et al. (2001) deshidrataron melón en solución de sacarosa de 60 °Brix a 25 °C durante 1 hora y luego congelaron las muestras en un congelador con corriente de aire a -48 °C. Ellos encontraron que la disminución de humedad previa al congelado reduce las pérdidas por exudado, mejorando la textura de las muestras de melón descongelado respecto de las mismas sin deshidratar. Marani et al. (2007) encontraron que la cantidad de exudado disminuye con el tiempo de inmersión en solución hipertónica y que este comportamiento varía con el azúcar utilizado y el efecto es diferente para las diferentes frutas en estudio: en kiwis, manzanas y peras los valores mas bajos de exudado se obtuvieron aplicando deshidratación con sacarosa, en tanto que para frutillas la deshidratación osmótica con sacarosa proporcionó los valores de exudado más altos. Los resultados de Talens et al. (2002b) en un estudio de osmo-dehidrocongelación de kiwis son coincidentes con los anteriores, ya que las muestras deshidratadas con solución de sacarosa de diferente concentración exhiben una notable disminución en el volumen de exudado respecto de las

muestras sin deshidratar, durante el proceso de descongelación. En los dos últimos trabajos las muestras se congelaron a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Además de la cantidad de exudado, las características sensoriales como el color y la textura de la fruta son los factores que determinan la aceptabilidad del consumidor hacia los vegetales congelados. El tratamiento osmótico previo al proceso de congelación prácticamente no afecta la calidad de rodajas de kiwi en términos de los parámetros del color (Talen et al, 2002b; Marani et al., 2007) cuando la deshidratación se lleva a cabo en solución de sacarosa y se observa un menor pardeamiento en manzanas y peras (Marani et al., 2007), respecto de la fruta congelada sin previa deshidratación. Esferas de melón congelado con previa deshidratación osmótica en solución de sacarosa presentaron muy escasas diferencias en los parámetros del color (leve incremento en el *chroma*) respecto de la fruta congelada sin previa deshidratación (Maestrelli et al., 2001).

La calidad de las arvejas dehidrocongeladas, que fueron deshidratadas por inmersión en solución acuosa de NaCl, se evaluó en base a la dureza, color, sabor y aceptabilidad global (Biswal et al., 1991) y se comparó con la calidad sensorial de las arvejas congeladas sin previa deshidratación. De acuerdo al puntaje otorgado a las muestras por el panel de consumidores puede decirse que las arvejas dehidrocongeladas no tuvieron diferencias en aceptabilidad global, en sabor ni en color con aquellas simplemente congeladas, aunque las registraron con menos dureza.

Spiazzi et al. (1998) realizaron la evaluación sensorial comparativa de manzanas, melón y kiwi congelados y dehidrocongelados sobre el alimento elaborado – tarta de manzanas, yogurt con kiwi y helado de melón -. En todos los casos los productos elaborados a partir de fruta dehidrocongelada mostraron tener buena o mejor consistencia que los respectivos elaborados a partir de fruta congelada.

Por otra parte, Robbers et al. (1997) estudiaron la influencia del mecanismo de deshidratación, secado con aire y deshidratación osmótica con sacarosa, sobre el color, contenido de ácido ascórbico y textura de kiwi dehidrocongelado. Ellos observaron que un modo de evitar las pérdidas del nutriente durante la deshidratación osmótica es a través de la adición de ácido ascórbico a la solución hipertónica. Durante el secado con aire se observó que la temperatura del proceso y la intensidad del secado favorecieron la degradación de ácido ascórbico del kiwi. Un largo período de secado con aire afecta más al

color que la deshidratación por ósmosis. El secado con aire es el proceso que otorga más firmeza a la fruta. La etapa de congelación es la que afecta en forma más negativa a la firmeza de la fruta.

Giannakourou & Taoukis (2003b) analizaron el efecto de la deshidratación osmótica previa al congelado de arvejas sobre la calidad nutricional (vitamina C) y aspecto (color). Además evaluaron el efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la calidad del producto. Los autores demostraron un significativo aumento de la retención de ácido ascórbico en las arvejas dehidrocongeladas en comparación con aquellas congeladas sin tratamiento previo, en todas las condiciones de almacenamiento aplicadas. La relación entre la retención del nutriente y la temperatura de almacenamiento sigue un comportamiento tipo Arrhenius, para todas las muestras. El proceso osmótico produce, en si mismo, cambios en los parámetros instrumentales del color, principalmente en los valores de  $a$ . Existe una importante pérdida del color verde durante el almacenamiento, que se traduce en un incremento de los valores de  $a$ , y se determinó que la velocidad de degradación del color tiene una fuerte dependencia con la temperatura de almacenamiento. El pre-tratamiento osmótico benefició la retención del color cuando fue realizado con una mezcla de oligofruktosa-trehalosa.

En otro trabajo, Giannakourou & Taoukis (2003a) demostraron que la retención de vitamina C en vegetales verdes congelados depende de la naturaleza del vegetal y de la temperatura de almacenamiento.

Biswal et al. (1991) evaluaron la aceptación sensorial de chauchas congeladas con deshidratación previa en NaCl y sin deshidratar. El análisis estadístico mostró análoga aceptación global para ambas muestras, pero importantes diferencias en el sabor y en la dureza. Los resultados del panel sensorial indicaron que el producto obtenido era de calidad organoléptica aceptable.

## **5. Parámetros de calidad durante la deshidratación de vegetales**

### **5.1 Introducción**

Las propiedades comúnmente examinadas de productos secados se pueden clasificar en dos categorías importantes: las que se relacionan con la ingeniería de los productos y las que se relacionan con la calidad del producto.

Los aspectos relacionados a la ingeniería del secado de los alimentos son esenciales en el diseño de los procesos, selección del equipo utilizado y en la operación eficiente de la planta. Su estudio implica determinar condiciones eficientes de difusividad de humedad y conductividad térmica; conocer el calor específico, el contenido de agua del equilibrio y la viscosidad del producto, entre otros.

El término "calidad" abarca varios parámetros del material secado, tanto en las etapas intermedias o al final del proceso de secado. Aunque estas propiedades no son necesarias para la predicción del tiempo de secado y modelado del proceso, son importantes para la caracterización y la predicción de la calidad del producto seco. Son también muy importantes para el desarrollo de nuevos productos industriales con características deseadas o para mejorar la calidad de los ya existentes. Las propiedades relacionadas con la calidad se podrían agrupar de la siguiente manera:

- propiedades estructurales (densidad, porosidad, volumen específico)
- propiedades texturales (ensayos de compresión, de tensión-relajación)
- propiedades ópticas (color, apariencia)
- propiedades sensoriales (aroma, sabor)
- características nutricionales (vitaminas, proteínas)
- propiedades de rehidratación (velocidad y capacidad de rehidratación)

El método de secado y los cambios fisicoquímicos que ocurren durante el proceso suelen afectar las características de calidad del producto deshidratado. Más específicamente, el método de secado y las condiciones del proceso afectan significativamente el color, textura, densidad y porosidad y las características de absorción de los materiales. Así pues, la misma materia prima puede terminar como un producto totalmente diferente, dependiendo del tipo de método de secado y de las condiciones aplicadas.

La necesidad de incrementar la producción eficiente de productos alta calidad a un costo competitivo ha conducido en la práctica al empleo de variados métodos de secado. Cada método de secado tiene parámetros característicos, que pueden ser regulados, cambiando de esta manera el mecanismo del transporte de la humedad y la velocidad de deshidratación. Se ha probado que el mecanismo de transporte de la humedad y la velocidad a los cuales se seca el material están relacionados con las propiedades de calidad del producto seco. Los métodos y las condiciones de secado más comúnmente usados son los siguientes:

• *Secado convencional con aire* es una de las operaciones de mayor uso para la deshidratación de alimentos. Los parámetros de secado usualmente examinados para controlar la calidad del producto son los siguientes:

- temperatura del aire (50 a 90 °C para materiales alimenticios)
- humedad relativa del aire (10 – 40 % para materiales alimenticios)
- velocidad del aire (1- 4 m/s)

• *El secado con microondas* es un método alternativo de secado, que ha sido aplicado recientemente en la industria alimenticia. Se ha demostrado que el calentamiento dieléctrico con microondas (MW) reduce el tiempo de secado de muchos productos agrícolas y se utiliza generalmente como tratamiento previo al secado convencional. Los parámetros de secado que se examinan generalmente para regular la calidad del alimento son los siguientes:

- potencia dieléctrica
- tiempo de exposición a la radiación MW

• *La deshidratación osmótica* es un proceso que origina productos de humedad intermedia, donde el agua fluye desde el sólido hacia una solución concentrada y el soluto se transfiere desde la solución hacia el producto. Normalmente es una técnica de pre-tratamiento empleada para alcanzar simultáneamente la desecación y direccionar la formulación del producto (con la impregnación más la lixiviación). Los parámetros usualmente examinados para controlar la calidad del producto son los siguientes:

- concentración del soluto
- temperatura del proceso
- tamaño de la muestra
- velocidad de agitación
- tiempo de inmersión

• *La liofilización* es uno de los métodos más sofisticados. Hace uso del hecho de que cuando la presión de sistema se mantiene tan baja que el punto de ebullición está debajo de 0 °C, el agua en el material permanece congelada y sublima sin afectar los sólidos secos. El método de liofilización provee productos secos de estructura porosa con propiedades ventajosas de calidad, que se contrapesan con su alto costo de tratamiento. El principal

parámetro del método de secado es la presión aplicada, que corresponde a una temperatura específica de sublimación del hielo.

## **5.2 Propiedades estructurales**

La estructura del alimento tiene un efecto profundo en las propiedades de transporte de los alimentos (por ejemplo, difusividad, permeabilidad y conductividad térmica), por lo tanto es importante saber la estructura física de un material alimenticio. La estructura del material de un alimento se puede caracterizar por su densidad aparente, densidad de sólidos, porosidad a granel, distribución de tamaño de poros, volumen específico, etc.

La determinación de las propiedades estructurales de un material se basa en la determinación de la masa, el volumen aparente y volumen real. La masa es determinada por medición del peso de la muestra, mientras que hay varios métodos para medir el volumen aparente y volumen real.

**El volumen aparente.** Los métodos comúnmente utilizados para determinar el volumen aparente de un material sólido pueden ser resumidos como sigue:

- métodos de desplazamiento de volumen: el volumen aparente es determinado colocando la muestra en un recipiente con un volumen de líquido conocido y midiendo el volumen de líquido desplazado (Krokida & Maroulis, 1997).

- métodos dimensionales: el volumen aparente es determinado haciendo un promedio de un número de medidas de la dimensión con micrómetros, suponiendo formas simples tales como esfera, cilindros o placas plana (Lozano et al. 1983; Karathanos & Saravacos 1993; McMinn & Magee, 1997a,b).

### **Factores que afectan las propiedades estructurales**

Una explicación de los cambios observados de propiedades estructurales durante el secado, podría ser presumida que en las primeras etapas de deshidratación, los tejidos celulares son bastante elásticos y puede contraerse el espacio correspondiente a la humedad evaporada. En la medida que progresa el secado, los cambios estructurales en los tejidos celulares dan lugar a una red más rígida, favoreciendo así el desarrollo de la porosidad. Este comportamiento depende claramente de varios factores, los que definen las características estructurales del material seco. Estos factores son:

- contenido de agua

- método de secado
- condiciones de secado

Las características estructurales de los alimentos son afectadas fuertemente por el contenido de agua del material. La difusión de las moléculas de agua durante el secado puede agrietar a la estructura sólida, causando daño estructural y cambios significativos a todas las propiedades estructurales. Por ejemplo el volumen específico frecuentemente disminuye de modo lineal con el contenido de agua durante el secado convencional, mostrando similar comportamiento para diferentes frutas y hortalizas (McMinn & Magee, 1997a,b; Hernandez et al., 2000)

El método de deshidratación también afecta algunas características estructurales de los alimentos, principalmente vegetales. Así, por ejemplo, el volumen específico prácticamente no presenta cambios durante el proceso de deshidratación por liofilizado. No obstante, el fenómeno de encogimiento es importante en los procesos de secado convencional y de deshidratación osmótica, y es menos intenso en los procesos de secado al vacío o con microondas. La aplicación de vacío al proceso de secado o deshidratación afecta notablemente la densidad aparente y la porosidad (Fito et al., 1996).

Lewicki & Lukaszuk (2000) demostraron en muestras de manzanas que la remoción de agua por ósmosis genera menor encogimiento que el secado con aire. Para una disminución relativa del agua de aproximadamente el 50 %, el encogimiento observado en el proceso osmótico fue del 3 % en tanto que durante el secado con aire el encogimiento fue de aproximadamente el 47 %. El encogimiento de las muestras de manzanas durante el secado con aire fue equivalente al volumen del agua evaporada hasta que se retiró el 60 % del agua, luego el encogimiento causado por el secado fue mucho menor que el volumen del agua evaporada.

### **5.3 Propiedades ópticas (color)**

El color es la sensación experimentada por un individuo cuando energía radiante dentro del espectro visible incide sobre la retina del ojo. Es por ello que las fuentes luminosas tienen un papel fundamental en colorimetría. En el caso de un estímulo que alcance directamente al ojo, la fuente luminosa es el color. En el caso de un estímulo reflejado por un objeto

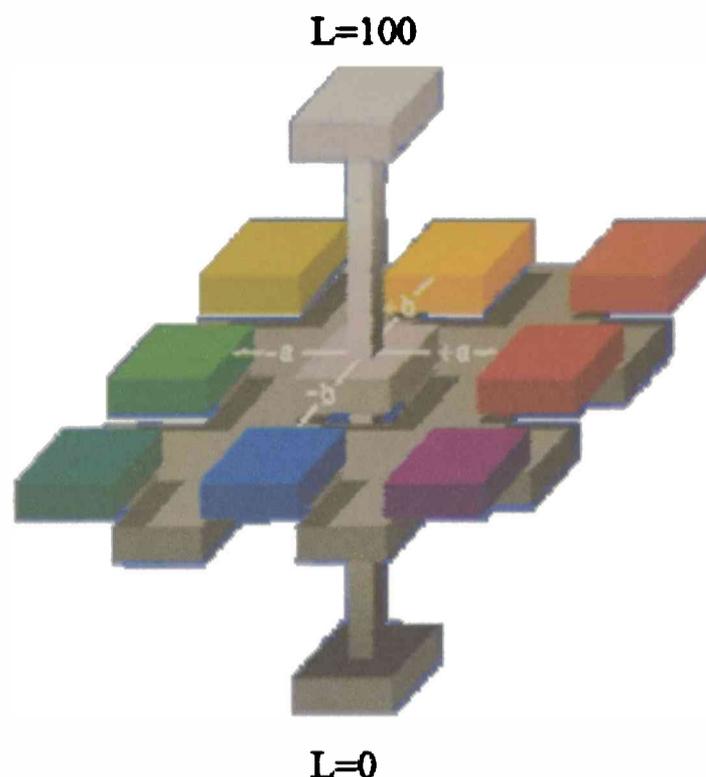
opaco o transmitido a través de un objeto transparente, la fuente luminosa contribuye a crear la sensación de color.

Los principios fundamentales de la colorimetría están dados por las Leyes de Grassman, donde se establece que cualquier color puede ser igualado por la suma de tres colores primarios en cantidades convenientes. En la práctica los colores primarios utilizados en forma aditiva son: rojo, verde y azul. La suma de todos ellos produce la sensación de luz blanca o acromática. Los objetos son coloreados porque absorben selectivamente determinada radiación electromagnética de la luz incidente sobre ellos.

Para la determinación del color en sólidos se ha desarrollado el sistema del *CIE* (Commission International de L'Eclairage). El *CIE* ha adoptado métodos para la medida y especificación del color que incluyen:

1. El uso de fuentes de luz estándares según lo prescrito por la definición del *CIE*
2. Las condiciones exactas para la observación o medición del color de la muestra
3. El uso de unidades matemáticas apropiadas mediante las cuales se puede expresar el color del objeto
4. Definición de las curvas o tablas del "observador estándar" que relacionan la medida objetiva con la respuesta visual, y así, medir lo que ve el ojo.

En 1976, el *CIE* recomendó el uso de la escala de color *CIE L\*a\*b\**, o *CIELAB* (Figura I.10). El máximo valor de  $L^*$  (luminosidad) es 100, y representa una perfecta reflexión difusa, en tanto que el valor mínimo es cero y representa el color negro. Los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  no presentan límites numéricos específicos. La coordenada  $a^*$  varía desde el rojo ( $+a^*$ ) al verde ( $-a^*$ ), y la coordenada  $b^*$  del amarillo ( $+b^*$ ) al azul ( $-b^*$ ). Los valores delta ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ ) indican cuanto difirió una muestra de su patrón o estándar para  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , y son frecuentemente utilizados en el control de calidad y ajustes de formulación, además de ser utilizados para el cálculo de la diferencia total de color ( $\Delta E^*$ ) (HUNTERLAB, 1996).



**Figura 1.10.** Espacio de color CIELAB (sistema de colores Hunter)

Los cambios de color del material durante la deshidratación no solamente se deben a la evaporación del agua superficial sino también a ciertas reacciones, tales como pardeamiento enzimático, pardeamiento no enzimático y reacciones de caramelización (Lozano & Ibarz, 1997). Estas reacciones pueden ser indeseables para muchos productos, así la regulación del color durante el secado o deshidratación es tema de análisis de varios procedimientos, tales como la desviación de la temperatura de rangos especificados, aplicación del secado intermitente, uso de agentes protectores del color (por ej. dióxido de azufre), etc.

### Medidas y escalas de medición

La medida del color es hecha con técnicas colorimétricas mediante el análisis del espectro de la luz producida por un instrumento y reflejada en la superficie del producto. Los colorímetros triestímulo trabajan con sistemas de filtros que reproducen más o menos bien un sistema de visión triestímulo. Son menos sensibles que un espectrofotómetro pero de más fácil utilización y más económicos.

Los tipos de colorímetros que se han empleado extensamente en alimentos en América, hasta la fecha, son los instrumentos de Hunterlab, las series de Gardner, el Color-Eye, el Colormaster y el Tintometer. Además se han desarrollado recientemente técnicas e

instrumentos especiales para determinados grupos de productos alimenticios, por ejemplo, Minolta vende un colorímetro especialmente desarrollado para cuantificar color en harinas. Las unidades más comunes de la medida del color son el *RGB* (Red, Green, Blue), *Lab* (luminosidad, Rojo-verde, Amarillo-azul) y escalas de *XYZ* que analizan el color en estos parámetros, para poder cuantificar fácilmente cada color compuesto mediante un sistema de tres números.

La conversión de datos a partir de un tipo de instrumento o de un sistema a otro está generalmente dada a través del sistema del *CIE-XYZ*, y las ecuaciones son provistas en las instrucciones de cada fabricante. El Agtron también se ha utilizado extensamente en alimentos, pero no hay métodos satisfactorios para convertir los datos de Agtron a *XYZ*.

La descripción cualitativa de un color puede realizarse en función de los atributos del color. Ellos son: la claridad, el tono y la saturación.

La claridad o luminosidad es el atributo que hace corresponder a cada color una equivalencia con respecto a una escala de grises.

El tono o tipo de color (*hue*) es el atributo de percepción del color por el cual un objeto es juzgado de un color específico (por ej. verde, amarillo, azul, etc.).

La saturación (*chroma*) es el atributo que, junto al tono, describe el color por su similitud con un color espectral puro. El *chroma* describe la intensidad o pureza de un color, es decir, la cantidad de blanco (o gris) presente en un color sólido. El *chroma* es utilizado para especificar la posición del color de un objeto entre el gris y el *hue* puro.

Por otra parte, dentro de cada espacio cromático estos atributos se expresan mediante funciones diferentes, como:

-  $\text{Ángulo hue} = \tan^{-1}(b/a)$

-  $\text{Chroma} = (a^2 + b^2)^{1/2}$

La especificación del color en una fruta es simplemente la especificación de un punto en un espacio tridimensional que puede tener diferentes escalas (por ej. *L*, *a*, *b*). Estos datos crudos pueden ser convertidos es un sistema o parámetros que se acercan mas a la percepción visual del color y que describen mejor las diferencias entre las muestras, como son el *hue* y el *chroma*.

### **Aplicación de la colorimetría triestímulo en la preservación de frutas y hortalizas**

El proceso de secado de frutas y hortalizas genera numerosos cambios en el alimento, algunos son directamente percibidos por el consumidor como el color y la apariencia. El estudio de estos atributos sensoriales puede ser abordado de dos formas: mediante el análisis sensorial y mediante el empleo de técnicas instrumentales. Algunos cambios en el color suelen estar asociados a reacciones de deterioro natural en las frutas, como el pardeamiento y disminuyen la aceptabilidad del producto. Otros cambios en el color, generados por la deshidratación, son asociados a la madurez de la fruta y no afectan la calidad. Es por ello que numerosos autores han analizado los cambios de color para evaluar la calidad de la fruta procesada. La colorimetría triestímulo es ampliamente utilizada como método instrumental de evaluación del color y ha sido aplicada durante el secado y preservación de frutas y hortalizas como medida objetiva de la calidad (Bartolomé et al., 1996; Lozano & Ibarz, 1997; Waliszewski et al., 1999a,b; Tsami & Katsioti, 2000; Ohaco et al., 2001; Maskan, 2001; Tan et al., 2001).

Los cambios del color que ocurren durante la deshidratación de vegetales frecuentemente están asociados a la cinética de reacciones de pardeamiento, pérdida de pigmentos y concentración de sólidos solubles. La relación entre la velocidad de deterioro del color y la temperatura del proceso de preservación aplicado a las frutas sugiere que existe normalmente más de un mecanismo involucrado en los cambios del color (Lozano & Ibarz, 1997).

La cinética de la alteración del color es afectada por muchos factores durante el procesamiento, de los cuales los más importantes son el método de remoción de agua y las condiciones con que se lleva a cabo este proceso.

El deterioro del color en función de las características del secado ha sido ampliamente estudiado para un gran número de vegetales, principalmente en manzanas (Mandala et al., 2005), bananas y papas (Krokida et al., 1998; Tsami & Katsioti, 2000; Ohaco et al., 2001).

Krokida et al. (1998) utilizan exámenes instrumentales del color como una medida de la calidad, para comparar el efecto de diferentes condiciones de humedad y temperatura durante el secado convencional de manzana, banana, zanahoria y papa. A su vez comparan estos resultados con los obtenidos durante el secado al vacío. Encontraron que el parámetro *L* es independiente de las condiciones y del método del secado; los valores *a* y *b* cambian

en función a ambas variables (humedad y temperatura del aire), por lo que se considera que los cambios en el color durante el secado puedan ser controlados escogiendo las condiciones de procesamiento más apropiadas.

Ohaco et al. (2001) aplican lecturas instrumentales para estudiar la evolución del color en cherries durante el secado a diferentes temperaturas; comparan lecturas Hunter de la superficie del producto con medidas espectrofotométricas indicativas de la disminución de los pigmentos rojos en el tejido vegetal. Tsami & Katsioti (2000) analizan los cambios de color durante el secado de paltas, frutillas y ciruelas; Tan et al. (2001) utilizan los valores instrumentales del color para comparar el efecto de los pre-tratamientos sobre la calidad final del producto seco en ananá.

Maskan (2001) utiliza los cambios de color para comparar el efecto de los diferentes tipos de secado, convencional con aire caliente y secado con microondas, sobre la calidad final de la fruta de kiwi. En dicho trabajo se analizó la cinética de cambio de color del kiwi a través de los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $L$  y los parámetros *hue* y *chroma*.

Otro proceso de deshidratación utilizado en la preservación de frutas es la deshidratación osmótica. Waliszewski et al. (1999b) aplican medidas instrumentales del color para seleccionar las condiciones de deshidratación osmótica que generen los mínimos cambios de color en lonjas de banana. Rodríguez et al. (2003) aplican estas medidas instrumentales para analizar el efecto de las distintas condiciones de deshidratación osmótica en papaya.

Estas medidas, como parámetros de calidad, han sido aplicadas para estudiar el efecto de largos tiempos de tratamiento térmico a altas temperaturas sobre el deterioro del color de pulpa concentrada de manzana, pera y ciruela (Lozano & Ibarz, 1997) y como parámetro crítico en la determinación de la vida útil de manzanas cortadas y trozadas (Rocha & Morais, 2003).

Bartolomé et al. (1996) utilizan el color para analizar el efecto de la velocidad de congelamiento y las condiciones de almacenamiento sobre rodajas de ananá. Los resultados sensoriales mostraron que el proceso de congelación produce un leve incremento en la intensidad del color. Los resultados indicaron que no existe correlación entre las medidas instrumentales y el color percibido por el ojo humano, ya que las medidas instrumentales indican un leve incremento del color blanco y disminución del verde y del amarillo y la evaluación sensorial indica un incremento en la intensidad del color amarillo.

El diverso comportamiento de muestras secadas bajo diferentes métodos demuestra que el método de secado afecta significativamente los cambios de color que ocurren durante el proceso. Muestras de ananá y papas deshidratadas osmóticamente y posteriormente secadas con aire caliente preservan mejor el color que aquellas solamente secadas con aire caliente (Tan et al., 2001). Resultados similares fueron publicados por Mandala et al. (2005) en un estudio de secado de manzanas, concluyendo que la mejor retención de las características del color se lograba con un tratamiento osmótico previo al secado con aire caliente. Así, un método que puede ser empleado para la preservación del color es la inmersión de frutas en la solución del azúcar.

El efecto del método de deshidratación (secado convencional con aire, a vacío, microondas, deshidratación osmótica y liofilizado) sobre las características del color ha sido estudiado para papas, manzanas, bananas y zanahorias (Krokida et al., 2001). La preservación del color se puede evaluar a través del parámetro  $L$  de luminosidad y los parámetros del chroma ( $a$ ,  $b$ ). Así, la liofilización y la deshidratación osmótica parecen prevenir el deterioro del color durante el secado con aire, dando por resultado productos con características del color superiores comparados con los productos secados con otros métodos (Krokida et al., 2001).

#### **5.4 Propiedades texturales o propiedades mecánicas (compresión)**

El término “textura” es difícil de definir ya que tiene diferentes significados para diferentes personas. Es por ello que en tecnología de alimentos al referirse a la textura de los mismos se representan las siguientes características:

- es un grupo de propiedades mecánicas relacionadas a la estructura del alimento
- se refiere a un grupo de propiedades, no a una única propiedad, es por ello que se suele referir a las “propiedades texturales de los alimentos”.
- la textura es percibida por el contacto, usualmente en la boca aunque otras partes del cuerpo pueden estar involucradas (frecuentemente las manos)
- no está relacionada con las sensaciones organolépticas químicas de sabor y olor
- las mediciones objetivas de textura se expresan mediante funciones que involucran las dimensiones fundamentales de masa, distancia y tiempo, solamente. Por ejemplo, fuerza tiene las dimensiones  $MLt^{-2}$ .

La textura es uno de los parámetros más importantes relacionados con la calidad del alimento. Las propiedades mecánicas o textura se relacionan generalmente con ensayos mecánicos, que examinan el comportamiento visco-elástico del material. Las propiedades mecánicas pueden definirse como aquellas que están directamente relacionadas con el comportamiento del material bajo la aplicación de fuerzas.

Después de esta amplia definición, propiedades tales como el comportamiento tensión-deformación de un material bajo carga estática y dinámica, así como las características de flujo de un material pueden clasificarse como propiedades mecánicas.

El ensayo de compresión uniaxial es una de las técnicas más comunes para la valoración de la textura. La aproximación más sencilla consiste en medir la fuerza máxima aplicada o tensión a la fractura del material. La cuantificación de algunos términos difíciles tales como dureza, ha sido realizada a través de una metodología llamada análisis de perfil de textura (Texture Profile Analysis). Los ensayos de compresión se realizan aplicando velocidad de deformación constante y registrando fuerza y deformación. De esta manera se construyen curvas de compresión tensión-deformación. La compresión se continúa generalmente hasta la fractura de la muestra.

#### **Relación entre propiedades mecánicas instrumentales y sensoriales**

El perfil sensorial de textura de un alimento sólido incluye características mecánicas, geométricas y de humectación. La relación existente entre el perfil sensorial de textura y ensayos de compresión uniaxial ha sido particularmente estudiada por Thybo & Nielsen (2000) en cilindros de papas. Se evaluaron nueve atributos sensoriales, comprendiendo las características mecánicas, geométricas y de humectación. Estos investigadores concluyeron que todos los atributos sensoriales de características mecánicas, excepto la adhesividad, son bien correlacionados con las medidas instrumentales de los ensayos de compresión. Los parámetros de Henky tensión a la fractura ( $\sigma_{Hf}$ ), deformación ( $\epsilon_{Hf}$ ) y el módulo de deformabilidad o elasticidad (E) presentaron excelente correlación con los atributos sensoriales mecánicos de dureza, firmeza y elasticidad, respectivamente. Para mejorar la correlación de los atributos sensoriales geométricos y de humectación con los parámetros de compresión es necesario contar también con datos químicos como el contenido de pectinas y de materia seca.

### **Efecto del método de deshidratación sobre las propiedades mecánicas**

Se encontró que el parámetro de elasticidad disminuye perceptiblemente con el contenido de agua de las frutas durante el secado, para todos los métodos y materiales de secado. Los valores del módulo de elasticidad de muestras de manzanas secadas con aire son mayores en las muestras osmóticamente tratadas para el mismo contenido de agua y dio valores más bajos que la elasticidad de materiales secados al vacío (Krokida & Maroulis, 2000). Los materiales liofilizados tenían los valores más altos del parámetro de elasticidad. Así, se puede concluir que la deshidratación osmótica redujo la naturaleza elástica de los productos, mientras que el secado al vacío y la liofilización aumentaron su elasticidad.

Chiralt & Talens (2005) estudiaron el efecto de la concentración de la solución hipertónica sobre las propiedades mecánicas durante la deshidratación osmótica de kiwi y frutillas, encontrando que la tensión a la fractura se incrementa con el incremento de la concentración de la solución, para idéntico grado de impregnación en la fruta de kiwi. La aplicación de pulsos de vacío al proceso de deshidratación provoca una disminución en los valores de este parámetro, posiblemente por ocasionar algún daño en la estructura del tejido vegetal. Por el contrario, las muestras de frutilla se comportaron de forma diferente: las muestras parecen ser más firmes cuando los tratamientos fueron realizados en soluciones osmóticas más diluidas y la influencia del vacío depende de la concentración de la concentración de la solución hipertónica.

Torres et al. (2006) analizaron la influencia de las condiciones del proceso de deshidratación osmótica sobre las propiedades mecánicas del mango, aplicando ensayos de compresión uniaxial. Encontraron que el tratamiento osmótico provoca disminución en la pendiente inicial (E) y de la tensión a la fractura e incrementa los valores de la deformación a la fractura. No obstante, no se observaron diferencias entre estos parámetros mecánicos en mango afectado a procesos de deshidratación osmótica con y sin aplicación de pulsos de vacío, sin adición de calcio. El agregado de sales de calcio al proceso osmótico provoca un incremento en los valores de E y de la tensión a la fractura ( $\sigma_{HF}$ ). El aumento en la concentración de la solución osmótica causó una disminución en los valores de tensión a la fractura, principalmente.

Por otra parte, Lewicki & Lukaszuk (2000) demostraron que la deshidratación osmótica afecta la respuesta mecánica del tejido de manzanas de forma mas variable que el secado

con aire caliente y que el efecto de ambos procesos de deshidratación (osmótico y convectivo) afectan las propiedades reológicas de las muestras de manzana de modo diferente. Los ensayos de compresión y relajación mostraron que las muestras de manzanas sometidas a tratamiento osmótico se deforman al modo de un cuerpo plástico, presentando valores de la pendiente inicial de la curva tensión-deformación,  $E$ , notablemente mayores a los que presentan las muestras de manzanas secadas con aire. El secado con aire provoca disminución en la elasticidad y resistencia a la deformación de la fruta.

### **5.5 Propiedades de rehidratación**

La rehidratación es un proceso complejo dirigido a restaurar las propiedades estructurales del material fresco (previo al secado o deshidratado) poniendo en contacto el producto seco con agua. No obstante se ha demostrado que la habilidad de rehidratación presenta una histéresis debido a la disrupción estructural y celular que tiene lugar durante el proceso de deshidratación (Krokida & Philippopoulos, 2005).

En la mayoría de los casos los alimentos secos deben hidratarse o embeberse en agua antes del consumo o la cocción, así las características de rehidratación constituyen uno de los más importantes criterios de calidad de los productos deshidratados, principalmente cuando se trata de frutas y hortalizas. En la práctica la mayoría de los cambios producidos en la matriz vegetal durante el secado son irreversibles y la rehidratación no puede ser considerada simplemente como un proceso reverso a la deshidratación (Lewicki, 1998). En general, la absorción de agua es rápida al inicio y disminuye con el tiempo de inmersión. Esta rápida ganancia de agua es debida a un efecto de succión superficial y capilaridad.

En algunos alimentos tales como las frutas secas para desayuno, la velocidad de rehidratación es de vital importancia en la valoración de calidad. El estudio de la cinética de rehidratación puede ser muy útil para el diseño y optimización de este proceso. Algunos autores modelaron el proceso de rehidratación considerándolo un fenómeno difusional descrito por la Ley de Fick (Sanjuán et al., 1999). Krokida & Marinos-Kouris (2003) estudiaron la cinética de rehidratación de numerosas frutas y hortalizas sobre la base de considerar que la ganancia de agua sigue una cinética de primer orden.

Sin embargo, detalles del comportamiento durante la rehidratación de frutas desecadas, son escasos. Esta se torna más importante si se comparan la cantidad de trabajos publicados

sobre secado y deshidratación con el número de estudios sobre la rehidratación de alimentos.

### **Factores que afectan la capacidad de rehidratación**

Desde el punto de vista de la ingeniería es de interés no solo el conocimiento de cuán rápida pueda ser la absorción de agua por el alimento sino también cómo se ven afectadas las propiedades de rehidratación por las variables del procesamiento previo. En este camino es de gran utilidad poder predecir el tiempo de rehidratación en condiciones definidas.

Los factores que afectan el proceso de rehidratación son: porosidad, capilares y cavidades próximas a la superficie, temperatura, existencia de burbujas de aire atrapadas, estado cristalino-amorfo, sólidos solubles, grado de sequedad, aniones y pH del agua de hidratación.

La porosidad y la existencia de cavidades y capilares próximos a la superficie favorecen la rehidratación, en tanto que la presencia de burbujas de aire atrapadas es el mayor obstáculo para la invasión del fluido hacia la matriz alimenticia.

Hay una resistencia de la estructura cristalina hacia la hidratación en tanto que las regiones amorfas se hidratan rápidamente. La presencia de aniones en el agua afecta incrementando el volumen durante la absorción de agua.

La comparación de las propiedades estructurales del producto fresco y re-hidratado permite, muchas veces, tener una valoración del daño producido en el material durante el secado. El grado de rehidratación también depende del grado de disrupción celular.

Los procesos de deshidratación, especialmente el secado, *per se*, provocan muchos cambios en la estructura y composición del tejido vegetal (McMinn & Mague, 1997a,b). El deterioro de los atributos físico-químicos del sistema puede ser evaluado sobre la base de las características de rehidratación. De aquí que la rehidratación puede ser considerada una medida del daño al material causado por el proceso de deshidratación precedente.

De los datos encontrados en la literatura se puede ver que el grado y la velocidad de rehidratación dependen de las condiciones del proceso de deshidratación, de la naturaleza y composición del vegetal y de las condiciones de rehidratación (McMinn & Mague, 1997a; Krokida & Marinos-Kouris, 2003; Khaisheh et al., 2004).

McMinn & Mague (1997a) estudiaron las características de rehidratación de papas secadas a diferentes temperaturas, encontrando que al aumentar la temperatura del proceso de

secado las muestras mejoraban su habilidad para rehidratarse. Los autores explican este fenómeno en virtud al menor tiempo de exposición al aire caliente de las muestras secadas a mayor temperatura. Khaisheh et al. (2004) obtuvieron resultados similares en relación a la temperatura del aire durante el secado de papa y hallaron mayor habilidad de rehidratación en las muestras de papas secadas con microondas. Wang & Chao (2003) cuantificaron la capacidad de rehidratación a través del coeficiente denominado *relación de rehidratación* (RR) y encontraron que tanto la temperatura de secado como el espesor de las muestras afectan la velocidad de rehidratación de manzanas secadas con aire caliente. Los resultados muestran que el incremento en la temperatura (40-80 °C) de secado incrementa la velocidad de rehidratación (valores de RR más elevados) mientras que el incremento del espesor de las muestras (3-7 mm) disminuye la velocidad de rehidratación.

Krokida & Marinos-Kouris (2003) y Krokida & Philippopoulos (2005) estudiaron la cinética de rehidratación de numerosos vegetales y frutas secados a 70 °C y encontraron que la temperatura del agua de rehidratación influye de manera positiva sobre la velocidad de ganancia de agua y sobre la humedad final del producto. Por el contrario, Sanjuán et al. (1999) observaron que la humedad final o de equilibrio en brócolis disminuye al aumentar la temperatura del agua de rehidratación y sin embargo la velocidad de rehidratación aumenta con la temperatura, principalmente en las primeras etapas del proceso. Por otra parte, Lewicki (1998) observó inconsistencia en los procedimientos de medición y cálculo de los índices de rehidratación de alimentos secos, lo cual constituye una barrera en el análisis y comparación de los diferentes resultados hallados en la literatura.

Rastogi et al (2000) estudiaron la cinética de rehidratación de cubos de ananá pretratados con deshidratación osmótica con y sin pulsos de alta presión, asumiendo que la migración de agua y de solutos está gobernada por la difusión Fickiana. Estos autores encontraron que los coeficientes de difusión efectivos durante la rehidratación de las muestras de ananá sometidas a pulsos de alta presión son menores que los valores de los respectivos coeficientes de las muestras pre-tratadas con deshidratación osmótica a presión normal. Este efecto fue atribuido a los cambios estructurales del material celular. Simultáneamente, encontraron que la velocidad de rehidratación se incrementa con la temperatura del proceso.

El efecto de la concentración de la solución osmótica sobre las propiedades de rehidratación de zanahorias fue analizado por Rastogi et al. (2004). Los autores encontraron que un incremento en la concentración de sacarosa de 20 a 60 °Brix genera una disminución tanto en la velocidad como en la capacidad (humedad de equilibrio) de rehidratación de las muestras, posiblemente debido al colapso celular generado por la solución hipertónica. Por el contrario, muestras de zanahoria sometidas a inmersión en solución de 5 y 10 °Brix presentaron mayor velocidad y capacidad de rehidratación que el control, y obviamente, que las muestras antes mencionadas.

### **5.6 Características nutricionales**

La ciencia de la nutrición humana no es exacta debido a la individualidad del metabolismo humano. Sin embargo, en los últimos treinta años ha habido un considerable progreso en el conocimiento y en la transferencia social de dicho conocimiento. Los gobiernos hasta hace poco tiempo no han participado activamente en este problema y, menos aún, en su difusión. Las excepciones han sido Suecia (desde los años 60) y, más recientemente, el Reino Unido y Alemania, cuyos equipos gubernamentales de salud y nutrición se han destacado por sus fuertes declaraciones. Los consumidores están cada vez más enterados de la correlación entre la cantidad y la calidad de su ingesta alimenticia y de su consecuente bienestar fisiológico.

Se han establecido dosis de ingesta diaria recomendada para las vitaminas (A, B, C, D, etc.) y minerales (hierro, calcio). Está aumentando el interés en trazas de elementos tales como cinc y magnesio. El papel de la fibra insoluble dietética en el tránsito intestinal se aconseja generalmente. El papel de las fibras solubles (reducción posible del colesterol) sigue siendo incierto, aunque la demanda por los productos ricos en fibras solubles está incrementándose en los Estados Unidos. Se reconoce la necesidad de la moderación en el consumo de alcohol, aunque la definición entre los Estados Unidos y Europa del rango de qué constituye la moderación es aún poco clara. Finalmente, hay acuerdo en una necesidad total de aumentar el consumo de carbohidratos de larga cadena tales como pan, patata, pastas, etc. y de frutas frescas y vegetales en general.

Estas modificaciones culturales exigen “calidad nutricional” a los alimentos elaborados, lo cual a menudo implica cambios significativos en el proceso de elaboración y, en algunos casos, incremento de los costos.

Es muy variada y bien conocida la actividad biológica de la vitamina C en el ser humano y, como la mayoría de los nutrientes, debería ser preservada poniendo especial importancia en las operaciones y procesos involucrados en los distintos métodos de conservación. Por ello, la mejor manera de tratar de conservarla en los alimentos procesados es estableciendo las condiciones óptimas en cada uno de los pasos que integran el proceso. En el caso de los procesos de deshidratación sobre frutos que no han sido químicamente modificados previamente, la velocidad de degradación del nutriente frecuentemente está asociada a la velocidad de eliminación de agua. Esta, a su vez, está relacionada con las variables de operación que se puedan controlar y que afecten la velocidad de secado.

#### **Factores que afectan la retención de vitamina C**

Wang & Chao (2003) analizaron el efecto de la temperatura del aire sobre el contenido de vitamina C en manzanas parcialmente deshidratadas y encontraron que el aumento en la temperatura del aire incrementa la velocidad del proceso pero también la pérdida del nutriente. Resultados similares fueron publicados por Orikasa et al. (2008) en un estudio de secado de kiwi a diferentes temperaturas (40-70 °C)

La cinética de degradación del ácido ascórbico durante el secado con aire de *rosa canina* entera y en trozos ha sido investigada por Erenturk et al. (2005). El tiempo de secado, la temperatura del aire y el contenido de agua afectaron la velocidad de pérdida del contenido de la vitamina C durante el proceso. El corte de los frutos antes del secado acelera dicho proceso y aumenta la retención de la vitamina C. La pérdida de vitamina C fue aumentada dependiendo de la relación del oxígeno en las mezclas aire-CO<sub>2</sub> usadas como medio de secado. Estos resultados indican que la degradación de vitamina C durante el secado de frutas podría reducirse mediante el uso de un gas inerte.

Del mismo modo, una pérdida marcada de ácido ascórbico se observó durante el secado de tomates a 80 y 110 °C (Zanoni et al., 1999). Disminuciones del 40 y 80 % del ácido ascórbico fueron observadas durante el secado a 80 y 110 °C, respectivamente, para valores de humedad del sólido del 80 %. No se registró ácido ascórbico presente en muestras con

humedad del 50 % secadas a 110 °C, mientras que un valor de ácido ascórbico residual del 10 % fue detectado en muestras con 10 % de humedad a 80 °C.

El efecto de un pre-tratamiento osmótico o impregnación con azúcares previo al proceso de secado y congelación fue analizado por Torreggiani & Bertolo (2001). La incorporación de azúcares a rodajas de kiwi modificó su temperatura de transición de fase incrementando así notablemente la retención de vitamina C durante el almacenamiento de la fruta a -10 °C. Del mismo modo se muestra que una etapa osmótica previa al secado con aire a 65 °C mejora la estabilidad de la vitamina C en cubos de damascos. Asimismo, en dicho trabajo se registran datos que demuestran que a mayor enriquecimiento de las frutas en azúcar, mayor es el efecto crioprotector durante el almacenamiento en condiciones de congelación y durante el secado en aire caliente.

#### **Cinética de degradación del ácido ascórbico en alimentos**

Trabajos referentes a la degradación del ácido ascórbico en alimentos han sugerido que este fenómeno es bien descrito por una cinética de primer orden y la ecuación de Bigelow se ha aplicado en el modelado (Vieira et al., 2000; Uddin et al., 2002; Orikasa et al., 2008). Varios estudios han reportado pérdida de ácido ascórbico en vegetales durante el almacenamiento como función de la temperatura y de la actividad de agua (Nunes et al., 1998; Uddin et al., 2002; Tudela et al., 2002). Padio Sedas et al. (1994) desarrollaron una ecuación empírica para predecir la degradación del ácido ascórbico en muestras de ananá de humedad intermedia como una función de la temperatura de almacenamiento y la actividad del agua. La cinética de degradación de los componentes del alimento se puede relacionar con la movilidad molecular de la matriz del alimento, que es afectada por el volumen libre y por el tiempo de relajación molecular de la estructura del alimento. La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) ha sido usada como principal indicador de esta movilidad. Durante el secado, la remoción de agua incrementa sustancialmente el valor de  $T_g$ . Un modelo en base logarítmica y dependiente de la  $T_g$  se empleó con éxito para describir la cinética de degradación de la vitamina C durante secado de caquis (Nicoletti et al., 2004). A tal fin se adoptó un doble sistema de control de temperatura: temperatura fija del aire y temperatura fijada dentro de la fruta. En este trabajo se aprecia la variación de temperatura que ocurre en la fruta durante el proceso de secado.

## **Referencias Bibliográficas**

- Akiyama, T.; Hayakawa, K. 2000. Heat and moisture transfer and hygrophysical changes in elastoplastic hollow cylinder-food during drying. *Journal of Food Science*, 65: 315–323.
- Alzamora, S.M.; Salvatori, D.; Tapia, M.; López-Malo, A.; Welti-Chanes, J.; Fito, P. 2005. Novel functional foods from vegetable matrices impregnated with biologically active compounds. *Journal of Food Engineering*, 67: 205-214.
- Argandoña, E.; Nishiyama, C.; Dupas Hubinger, M. 2002. Qualidade final de melão osmoticamente desidratado em soluções de sacarose com adição de ácidos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37: 1803-1810.
- Arora, S.; Gharti, S.; Sehgal, V.K. 2006. Convective drying kinetics of red chillies. *Drying Technology*, 24: 189-193.
- Azuara, E.; Beristain, C.; García, H. 1992. Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *International Journal of Food Science and Technology*. 29: 239-242.
- Azuara, E.; Beristain, C.; Gutiérrez, G. 1998. A method for continuous kinetics evaluation of osmotic dehydration. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 31: 317-321.
- Balaban, M.; Pigott, G.M. 1988. Mathematical model of simultaneous heat and mass transfer in food with dimensional changes and variable transport parameters. *Journal of Food Science* 53: 935–939.
- Barat, J.; Talens, P.; Barrera, C.; Chiralt, A.; Fito, P. 2002. Pineapple candying at mild temperature by applying vacuum impregnation. *Journal of Food Science*, 67: 3046-3052.
- Bartolome A.; Ruperez P.; Fuster C. 1995. Pineapple fruit: morphological characteristics, chemical composition and sensory analysis of Red Spanish and Smooth Cayenne cultivars. *Food Chemistry*, 53: 75-79.
- Bartolome, A.; Ruperez, P.; Fuster, C. 1996. Freezing rate and frozen storage effects on color and sensory characteristics of pineapple fruit slices. *Journal of Food Science*, 61 (1): 154-156.
- Biswal, R.; Bozorgmehr, K. 1992. Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings. *Trans. ASAE*, 35(1): 257-262.
- Biswal, R.; Bozorgmehr, K.; Tompkins, F.; Liu, X. 1991. Osmotic concentration of green beans prior to freezing. *Journal of Food Science*, 56(4): 1008-1012.
- Castro, D.; Fito, P.; Treto, O.; Boys, T.; Nuñez de Villavicencio, M. 1998a. Influencia de la presión y otras variables de proceso en la transferencia de masa de piña deshidratada osmóticamente. Evaluación energética y estimación de costos. II Parte. *La Alimentación Latinoamericana*. 225: 33-39
- Castro, D.; Fito, P.; Treto, O.; Boys, T.; Nuñez de Villavicencio, M. 1998b. Influencia de la presión y otras variables de proceso en la transferencia de masa de piña deshidratada osmóticamente. Evaluación energética y estimación de costos. *La Alimentación Latinoamericana*. 224: 50-54.

- Chenlo, F.; Moreira, R.; Fernández-Herrero, C.; Vázquez, G. 2006. Osmotic dehydration of chestnut with sucrose: Mass transfer processes and global kinetics modeling. *Journal of Food Engineering* 78: 765–774.
- Chiralt, A.; Fito, P.; Barat, J.; Andrés, A.; González-Martínez, C.; Escriche, I.; Camacho, M. 2001. Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering* 49: 141-151.
- Chiralt, A.; Talens, P. 2005. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67: 167–177.
- Chirife, J. 1983. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. *Advances in Drying*, pp.73-102.
- Corzo, O.; Bracho, N.; Rodriguez, J.; Gonzalez, M. 2007. Predicting the moisture and salt contents of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering* 80: 781-790.
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2<sup>nd</sup> edition., Oxford University Press Inc., New York.
- Di Matteo, M.; Cinquanta, L.; Galiero, G.; Crescitelli, S. 2003. A mathematical model of mass transfer in spherical geometry: plum (*Prunus Domestica*) drying. *Journal of Food Engineering*, 58: 183-192.
- Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79: 243–248.
- El-Aouar, A.; Moreira Azoubel, P.; Barbosa, J.; Murr, F. 2006. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya L.*). *Journal of Food Engineering*, 75: 267–274.
- Eren, I.; Kaymak-Ertekin, F. 2007. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79: 344-352.
- Erenturk, S.; Gulaboglu, S.; Gultekin, S. 2005. The effects of cutting and drying medium on the vitamin C content of rosehip during drying. *Journal of Food Engineering*, 68: 513–518.
- Eshtiaghi, M.N.; Stute, R.; Knorr, D. 1994. High-pressure and freezing pretreatment effects on drying, rehydration, texture and color of green beans, carrots and potatoes. *Journal of Food Science*, 59: 1168–1170.
- Falade, K.; Igbeka, J.; Ayanwuyi, F. 2007. Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80: 979–985.
- FAO. 2003. Comité de problemas de productos básicos. Situación actual del mercado de frutas tropicales. <ftp://ftp.fao.org/unfao/bodies/ccp/ba-tf/04/j0773s.pdf>
- FAO. 2004. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas. Proyecciones al año 2010. Rome, 2004. ISBN 92-5-305077-2. ISSN 1811-7252
- Fito, P. 1994. Modeling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering*, 22: 313-328.

- Fito, P.; Andres, A.; Chiralt, A.; Pardo P. 1996. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*, 21: 229-240.
- García-Martínez, E.; Ruiz-Díaz, G.; Martínez-Monzó, J.; Camacho, M.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2002. Jam manufacture with osmodehydrated fruit. *Food Research International*, 35: 301–306.
- Geankoplis, C. J. 1983. *Transport processes and unit operations*. 2nd. Edition, Allyn and Bacon Inc, Boston.
- Gekas, Vassilis. 1992. *Transport phenomena of foods and biological materials*. CRC Press, Inc., Florida.
- Ghodake, H.M.; Goswami, T.K.; Chakraverty, A. 2006. Mathematical modeling of withering characteristics of tea leaves. *Drying Technology*, 24: 159-164.
- Giannakourou, M.C.; Taoukis, P.S. 2003a. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*, 83: 33-41.
- Giannakourou, M.C.; Taoukis, P.S. 2003b. Stability of dehydrofrozen green peas pretreated with nonconventional osmotic agents. *Journal of Food Science*, 68: 2002-2010.
- Giraldo, G.; Talens, P.; Fito, P.; Chiralt, A. 2003. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering*, 58: 33–43.
- Gras, M.; Vidal, D.; Betoret, N.; Chiralt, A.; Fito, P. 2003. Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation. Interaction with cellular matrix. *Journal of Food Engineering*, 56: 279-284.
- Hawkes, J.; Flink, J.M. 1978. Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2: 265-284.
- Hernández, J. A.; Pavón, G.; García, M. A. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 45: 1-10.
- Hough, G.; Chirife, J.; Marini, C. 1993. A simple model for osmotic dehydration of apples. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 26: 151-156.
- HUNTERLAB. 1996. Applications note: CIE L\* a\* b\* color scale. Virginia, v. 8, n. 7.
- Infoagro. 2002. El cultivo de la piña. [www.infoagro.com/frutas/frutas\\_tropicales](http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tropicales)
- Islam, M.R.; Mujumdar, A.S. 2003. Role of product shrinkage in drying rate prediction using a liquid diffusion model. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30: 391-400.
- Karathanos, V.T.; Saravacos, G.D. 1993. Porosity and pore size distribution of starch materials. *Journal of Food Engineering*, 18: 259-280.
- Karim, M.A.; Hawlader, M.N.A. 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 70: 35–45.

- Katekawa, M.E.; Silva, M.A. 2006. A review of drying models including shrinkage effects. *Drying Technology*, 24: 5-20.
- Kaymak-Ertekin, F.; Sultanoğlu, M. 2000. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46: 243-250.
- Khraisheh, M.A.M.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37: 497-503.
- Kiranoudis, C.T.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. 1995. Drying kinetics of onion and green pepper. *Drying Technology*, 13: 995-1011.
- Krokida, M.; Maroulis, Z. 2000. Quality changes during drying of food materials. En: *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*; editor: Mujumdar, A.S. Ed. Science Publishers, U.S.
- Krokida, M.K.; Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1-7.
- Krokida, M.K.; Maroulis Z.B. 1997. Effect of drying method on shrinkage and porosity, *Drying Technology*, 10: 1145-1155.
- Krokida, M.K.; Maroulis Z.B.; Saravacos, G.D. 2001. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology*, 36: 53-59.
- Krokida, M.K.; Philippopoulos, C. 2005. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology*, 23: 799-830.
- Krokida, M.K.; Tsami, E.; Maroulis Z.B. 1998. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16: 667-685.
- Lang, W.; Sokhansanj, S.; Rohani, S. 1994. Dynamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. *Drying Technology*, 12: 1687 - 1708.
- Lazarides, H.; Gekas, V.; Mavroudis, N. 1997. Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing. *Journal of Food Engineering*, 31: 315-324.
- Leal, F.; Avilán, L. 1995. Selección agroclimática de áreas para la producción de piña (*Ananas comosus*) cv. *Cayena lisa* en Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía (Maracay)*, 21:85-94.
- Lewicki, P.P. 1998. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36: 81-87.
- Lewicki, P.P.; Lukaszuk, A. 2000. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering*, 45: 119-126.
- Lewis, W.K. 1921. The rate of drying of solids materials. *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13: 427-432.

- Lozano, J.E.; Rotstein, E.; Urbicaín, M. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. *Journal of Food Science*, 48: 1497-1502.
- Lozano, J.E.; Ibarz, A. 1997. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 31: 365-373.
- Maestrelli, A.; Lo Scalzo, R.; Lupi, D.; Bertolo, G.; Torreggiani, D. 2001. Partial removal of water before freezing: cultivars and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon (*Cucumis melo, cv reticulatus* Naud.). *Journal of Food Engineering*, 49: 255–260.
- Mandala, I.G.; Anagnostaras, E.; Oikonomou, C.K. 2005. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 69: 307–316.
- Marani, C.; Agnelli, M.; Mascheroni, R.H. 2007. Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79: 1122–1130.
- Marchal, J.; Soler, A. 1991. L'ananás: qualité du fruit, son contrôle. *Fruits*, 46: 380-389.
- Marcotte, M.; Toupin, C.; Le Maguer, M. 1991. Mass transfer in cellular tissues. Part I: the mathematical model. *Journal of Food Engineering*, 13: 199-220.
- Maroulis, Z.B.; Kiranoudis, C.T.; Marinos-Kouris, D. 1995. Heat and mass transfer modeling in air drying of foods. *Journal of Food Engineering*, 26: 113- 130.
- Maskan, M. 2001. Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 42: 169-175.
- Mayor, L.; Sereno, A.M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61:373-383.
- McMinn, W.A.; Magee, T.R.A. 1997a. Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes - Part I. *Journal of Food Engineering*, 33: 37-48.
- McMinn, W.A.; Magee, T.R.A. 1997b. Physical characteristics of dehydrated potatoes - Part II. *Journal of Food Engineering*, 33: 49-55.
- Moreira, R.; Sereno, A. 2003. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering*, 57:25-31.
- Mulet, A. 1994. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22: 329-348.
- Mulet, A., Berna, A., Rosello, C. 1989a. Drying of carrots. I. Drying models. *Drying Technology*, 7: 537–557.
- Mulet, A., Berna, A., Rosello, C. Pinaga, F. 1989b. Drying of carrots. II. Evaluation of drying models. *Drying Technology*, 7: 641–661.
- Mulet, A.; García-Reverter, J.; Bon, J.; Berna, A. 2000. Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, 18: 1201-1219.
- Nascente, A.S.; Corrêa da Costa, R.; Medeiros Costa, J.N. 2005. Cultivo do Abacaxi em Rondônia. *EMBRAPA Rondônia Sistemas de Produção*, 3 ISSN:1807-1805 Versão

Eletrônica.

<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Abacaxi/CultivodoAbacaxiRO>

Nicoleti, J.; Silveira-Junior, V.; Telis-Romero, J.; Telis, V. 2004. Ascorbic acid degradation during convective drying of persimmons with fixed temperature inside the fruit. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, vol. C: 1836-1843.

Nogueira, R.I. 1991. Processo de secagem de banana (*Musa acuminiata* subgrupo Cavendish cultivar nanica): parâmetros ótimos na obtenção da banana-passa. Dissertação (Mestrado Faculdade de Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP.

Nunes, M.C., Brecht, J.K., Morais, A.M., Sargent, S.A. 1998. Controlling temperature and water loss to maintain ascorbic acid levels in strawberries during postharvest handling, *Journal of Food Science*, 63: 1033-1069.

Ohaco, E.; Pirone, B.; Ochoa, M.; Kessler, A.; De Michelis, A. 2001. Pigments evolution during air dehydration of sweet cherries. Proceedings of EMPROMER 2001, Santa Fe, vol. III, 1435-1440.

Orikasa, T.; Wu, L.; Shiina, T.; Tagawa, A. 2008. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85: 303–308.

Palou, E.; López-Malo, A.; Argai, A.; Welti, J. 1994. The use of Peleg's equation to model osmotic concentration of papaya. *Drying Technology*, 12: 965-978.

Panagiotou, N.; Karathanos, V.; Maroulis, Z. 1999. Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology*, 17: 175-189.

Pardio Sedas, V.; Waliszewski Kubiak, K.N.; Garcia Alvarado, M. 1994. Ascorbic acid loss and sensory changes in intermediate moisture pineapple during storage at 30-40°C. *International Journal of Food Science and Technology*, 29: 551-557.

Parjoko, M.; Rahman, S.; Buckle, K.; Perera, C. 1996. Osmotic dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 29: 452-459.

Park, K.J. 1987. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante secagem. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

Perré, P.; May, B.K. 2001. A numerical drying model that account for the coupling between transfer and solid mechanism. Case of high deformable products. *Drying Technology*, 19: 1629-1643.

Perré, P.; Passard, J. 2004. A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions. *Drying Technology*, 22: 27-44.

Py, Claude. 1969. *La Piña tropical*. Editorial Blume, Barcelona.

Queiroz, M.R.; Nebra, S.A. 2001. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, 47: 127-132.

- Rahman, M.S.; Perera, C.O.; Chen, X.D.; Driscoll, R.H.; Potluri, P.L. 1996. Density, shrinkage and porosity of calamari mantle meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, 30: 135–145.
- Ramallo, L.A. 2001. Deshidratación osmótica de ananá: Un modelo matemático sencillo. Magíster Thesis, UNaM, Argentina.
- Rastogi, N.K.; Nayak, C.A.; Raghavarao, K.S. 2004. Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering*, 65: 287–292.
- Rastogi, N.K.; Raghavarao, K. 1995. Kinetics of osmotic dehydration under vacuum. *Lebensmittel-Wissenschaft und – Technologie*, 29: 669–672.
- Rastogi, N.K.; Angersbach, A.; Niranjana, K.; Knorr, D. 2000. Rehydration kinetics of high-pressure pretreated and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Science*, 65: 838–841.
- Rastogi, N.K.; Niranjana, K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *Journal of Food Science*, 63: 508–511.
- Rastogi, N.K.; Raghavarao, K.S.; Niranjana, K. 1997. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. *Journal of Food Engineering*, 31:423-432
- Reppa, A.; Mandala, J.; Kostaropoulos, A.; Saravacos, G. 1999. Influence of solute temperature and concentration on the combined osmotic and air drying. *Drying Technology*, 17: 1449-1458.
- Riva, M.; Campolongo, S.; Leva, A.; Maestrelli, A.; Torreggiani, D. 2005. Structure-property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Research International*, 38: 533-542.
- Robbers, M.; Singh, R.P.; Cunha, L.M. 1997. Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit. *Journal of Food Engineering*, 62:1039-1047.
- Rocha, A.M.; Morais, A. 2003. Shelf life of minimally processed apple (*cv. Jonagored*) determined by colour changes. *Food Control*, 14: 13–20.
- Rodrigues, A.; Cunha, R.; Hubinger, M. 2003. Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering* 59: 129–135.
- Ruiz-López, I.I.; Córdova, A.V.; Rodríguez-Jimenes, G.C.; García-Alvarado, M.A. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, 63: 117–124.
- Sablani, S.; Rahman, S. 2003. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*, 36: 65–71.
- Sanjuán, N.; Simal, S.; Bon, J.; Mulet, A. 1999. Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27–31.

- Saurel, R.; Raoult-Wack, A.; Rios, G.; Guilbert, S. 1994. Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. *International Journal of Food Science and Technology*, 29: 531-542.
- Sereno, A.M., Moreira, R.; Martinez, E. 2001. Mass transfer coefficients during dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, 47: 43-49.
- Shi, J.; Le Maguer, M. 2002. Analogical cellular structure changes in solid-liquid contacting operations. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 35: 444-451.
- Shi, X.; Fito, P. 1994. Mass transfer in vacuum osmotic dehydration of fruits: a mathematical model approach. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 27: 67-72.
- Shi, X.; Fito, P.; Chiralt, A. 1995. Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Food Research International*, 28: 445-454.
- Simal, S., Mulet, A., Catalá, P. J., Cañellas, J.; Rosselló, C. 1996. Moving boundary model for simulating moisture movement in grapes. *Journal of Food Science*, 61: 157-160.
- Simal, S.; Femenia, A.; Garau, M.C.; Rosselló, C. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66: 323-328.
- Singleton, V. 1965. Chemical and physical development of the pineapple fruit I. Weight per fruitlet and other physical attributes. *Journal of Food Science*, 30: 98-104.
- Sopanankul, A.; Ledward, D.A.; Niranjana, K. 2002. Mass transfer during sucrose infusion into potatoes under high pressure. *Journal of Food Science*, 67: 2217-2220.
- Spiazzi, E.A.; Raggio, Z.I.; Bignone, K.A.; Mascheroni, R.H. 1998. Experiments in dehydrofreezing of fruits and vegetables: Mass transfer and quality factors. *Advances in the refrigeration systems, International Institute of Refrigeration Proceeding Series*, 6: 401-408.
- Spiazzi, E.A.; Mascheroni, R.H. 1997. Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables- I. Development of the simulation model. *Journal of Food Engineering*, 34: 387-410.
- Sun, Da-Wen. 2006. *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*. Primera edición, Capítulo 8. CRC Press, Florida, USA, ISBN-13: 978-1-57444-607-4.
- Suzuki, K.; Kubota, K.; Hasegawa, T.; Hosaka, H. 1976. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, 41: 1189-1193.
- Talens, P.; Escriche, I.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2002a. Study of the influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of strawberries. *Journal of Food Science*, 67: 1648-1653.
- Talens, P.; Martínez-Navarrete, N.; Fito, P.; Chiralt, A. 2002b. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3:191-199.

- Tan, M.; Chua, K.; Mujumdar, A.; Chou, S.K. 2001. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *Drying Technology*, 19: 2193-2207.
- Thybo, A.K.; Nielsen, M. 2000. Influence of uniaxial compression rate on rheological parameters and sensory texture prediction of cooked potatoes. *Journal of Texture Studies*, 31: 25-40.
- Togrul, I.; Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58: 23–32.
- Tonon, R.; Baroni, A.; Hubinger, M. 2007. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. *Journal of Food Engineering*, 82: 509–517.
- Torreggiani, D.; Bertolo, G. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, 49: 247-253
- Torres, J.; Talens, P.; Escriche, I.; Chiralt, A. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 74: 240–246.
- Tsami, E.; Katsioti, M. 2000. Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology*, 18: 1559-1581.
- Tudela, J.A.; Espín, J.C.; Gil, M.I. 2002. Vitamin C retention in fresh-cut potatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 26: 75-84.
- Uddin, M.; Ainsworth, P.; Ibanoglu, S. 2004. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 65: 473–477.
- Uddin, M.S.; Hawlader, M.N.; Luo, D.; Mujumdar, A.S. 2002. Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. *Journal of Food Engineering*, 51: 21-26.
- USDA. 1976–1993. *Composition of Foods—Raw, Processed, Prepared*. Agriculture Handbook No. 8, revisions.
- USDA. 1993. Computerized data sets used to create release 6 of the USDA Nutrient data base for individual food intake surveys. USDA Table of Nutrient Retention Factors.
- Vega Gálvez, A.; Tello Ireland, C.; Lemus Mondaca, R. 2007. Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria Chilena (*Gracilaria chilensis*). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 15: 55-64.
- Vega, A.; Andrés, A.; Fito, P. 2005. Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annuum L. cv Lamuyo*). *Información Tecnológica*, 16: 3-11.
- Vieira, M.C.; Teixeira, A.A.; Silva, C.L.M. 2000. Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. *Journal of Food Engineering*, 43: 1-7.
- Waliszewski, K.; Corzo, C; Pardio, V.; Garcia, M. 1999. Effect of proteolytic enzymes on color changes in banana chips during osmotic dehydration. *Drying Technology*, 17: 947-954.

- Waliszewski, K.; Texon, N.; Salgado, M.; García, M. 1997. Mass transfer in banana chip during osmotic dehydration. *Drying Technology*, 15: 2597-2607.
- Waliszewski, K.N.; Cortés, H.D.; Pardio, V.T.; García, M.A. 1999. Color parameter changes in banana slices during osmotic dehydration. *Drying Technology*, 17: 955-960.
- Wang, J.; Chao, Y. 2003. Effect of Co irradiation on drying characteristics of apple. *Journal of Food Engineering* 56: 347–351.
- Wang, N.; Brennan, J. G. 1995. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, 24: 47-60.
- Yao, Z.; Le Maguer, M. 1997. Analysis of mass transfer in osmotic dehydration based on profiles of concentration, shrinkage, transmembrane flux and bulk flow velocity in the domain of time and space. *Journal of Food Process Engineering*, 20: 401-414.
- Zanoni, B.; Peri, C.; Nanib, R.; Lavelli, V. 1999. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Research International*, 31: 395-401.
- Zogzas, N.; Maroulis, Z.B. 1996. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis. *Drying Technology*, 14: 1543–1573.

## **Capítulo II**

### **Secado**

## **Resumen**

Basado en referencias bibliográficas y resultados de ensayos preliminares, se seleccionaron las temperaturas de trabajo y el tamaño de muestra para desarrollar el presente estudio de secado de ananá con aire caliente.

El objetivo principal de esta etapa fue analizar la influencia de la temperatura y el grado de deshidratación sobre la calidad final de la fruta, a través de:

- cambios en el color, volumen y contenido de vitamina C
- el efecto de las condiciones del secado sobre las propiedades mecánicas y de rehidratación del producto

A partir de los resultados experimentales de cinética de secado y cambios en las propiedades fisicoquímicas durante el proceso, se efectuaron los siguientes estudios:

- se cuantificó la relación entre la pérdida de volumen de la fruta y el contenido de agua de la misma durante el secado, mediante un modelo empírico
- se validó un modelo difusional de transferencia de masa en el cual la variación de volumen observada sea tenida en consideración
- se desarrolló un modelo de predicción de la retención de vitamina C en condiciones dinámicas, y se lo validó con los datos experimentales obtenidos durante el secado de ananá con aire caliente
- se ajustó un modelo sencillo (Modelo de Page) para describir la ganancia de agua durante el proceso de rehidratación y se analizó el efecto de la temperatura durante la impregnación

## **1. Introducción**

Los vegetales son importantes componentes de la dieta diaria por su contribución en fibras, carbohidratos, minerales y vitaminas. Algunas frutas, como peras y manzanas, pueden conservarse en condiciones apropiadas por varios meses, pero otras frutas continúan su proceso de maduración y deterioro aún en condiciones de refrigeración. Este es el caso de las frutas tropicales, como el ananá. Por esta razón, para preservar su calidad nutricional es necesario aplicar alguna tecnología de preservación, como el secado. Este proceso tiene como principal objetivo disminuir el  $a_w$  del tejido vegetal, mejorando la preservación del alimento, altamente perecedero en su forma natural.

El secado de alimentos de alta humedad, como las frutas, genera gran cantidad de cambios físico y químicos. Algunos son directamente percibidos por el consumidor, como el color y las propiedades mecánicas; otros afectan la calidad nutricional, como la degradación de nutrientes y otros afectan la cinética y el diseño de los equipos, como la variación de volumen. Estos cambios, en su conjunto, afectan el aspecto del alimento y reducen la calidad organoléptica del mismo.

El color del ananá es un factor decisivo en la aceptabilidad del producto ya que un leve tono amarillo está asociado al grado de madurez y al desarrollo del flavour característico de la fruta (Bartolomé et al., 1996). El aumento de la temperatura durante el secado genera en los vegetales complejas reacciones de pardeamiento y degradación de pigmentos, al mismo tiempo que la deshidratación genera sencillamente la concentración de algunos pigmentos. Esta evolución del color puede cuantificarse objetivamente mediante medidas instrumentales y analizar de esta manera el efecto del procesamiento sobre las características del color.

Desde el punto de vista nutricional, el ananá es importante en la dieta por su aporte de vitamina C, fibras y minerales. La degradación del ácido ascórbico (AA) se ve afectada por numerosos factores tales como la temperatura, la actividad del agua, el pH, el tiempo de almacenamiento, etc. (Fennema, 1993; Pardo Sedas et al., 1994; Uddin et al., 2002; Nunes et al., 1998). La magnitud de la retención del AA durante el secado de vegetales, alimentos éstos de alto contenido de humedad y compleja composición química, depende de las condiciones con que se efectúe este proceso (Zanoni et al., 1999; Oriyasa et al., 2008).

Se han publicado varios estudios acerca de la pérdida de ácido ascórbico en vegetales en función del tiempo de exposición en condiciones constantes de temperatura y humedad ambiente (Nunes et al., 1998; Uddin et al., 2002; Tudela et al., 2002). Pardo Seda et al., 1994, desarrollaron una ecuación empírica para predecir la degradación del ácido ascórbico en ananá con valores fijos de humedad como una función de la temperatura y la actividad del agua, durante el almacenamiento del producto.

Santos & Silva (2009) evaluaron la cinética de degradación del ácido ascórbico en ananá durante el secado con atmósfera modificada mediante la adición de etanol. Estos autores mostraron que la presencia de etanol en el aire de secado consigue una mayor velocidad de evaporación del agua contenida en la fruta y por lo tanto, menor pérdida de vitamina C. Pero esto es válido en las condiciones propuestas para el trabajo (temperatura= 40-60 °C, velocidad de aire= 0.42-0.84 m/s), donde el movimiento interno de humedad no es el mecanismo netamente gobernante de la velocidad del proceso.

El secado con aire es generalmente considerado un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa. Estos fenómenos han sido modelados en dos tendencias generales: detallados y simplificados. Los modelos simplificados han sido ampliamente utilizados por un gran número de autores (Varadharaju et al., 2001; Márquez et al., 2006; Vega et al., 2007; Singh & Gupta, 2007) para predecir o describir la cinética de secado de frutas y hortalizas. Mulet (1994) describió modelos detallados con diferentes grados de complejidad aplicados al secado de alimentos. En dicho trabajo se concluyó que el principal factor que debe ser considerado es el encogimiento. También observó el autor que los errores de estimación de los modelos que consideran encogimiento y difusividad variables son similares a aquellos que consideran encogimiento y difusividad constante.

Por otro lado, el encogimiento de los alimentos durante el secado es evidente, principalmente en las frutas y hortalizas, y se tienen numerosos trabajos al respecto (Talla et al., 2004; Hassini et al., 2007; Dissa et al., 2008). Los modelos de predicción de los cambios de volumen y área superficial durante el secado de alimentos suelen ser el resultado del ajuste de los datos experimentales a modelos empíricos (Lozano et al., 1983; Ratti, 1994; Bernardi et al., 2001).

La variación del volumen durante el secado de alimentos influye en los resultados del coeficiente de difusión debido a que se produce una disminución en la distancia recorrida

por las moléculas de agua y debe ser tenido en cuenta al plantear las ecuaciones matemáticas para la predicción del tiempo de secado.

Pocos estudios se han publicado acerca del secado de ananá. Rahman & Lamb (1991) trabajando con una variedad de ananá africana, *Gian kew*, estudiaron la cinética de secado a 60 °C de la fruta fresca y osmóticamente deshidratada aplicando un modelo basado en la segunda Ley de Fick de la difusión, considerando volumen constante.

Nicoletti et al. (2001) analizaron la cinética de secado de rodajas de ananá (*comosus*) fresco y osmóticamente deshidratado bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire. Además, mediante control automático de la temperatura, obtuvieron curvas de secado con condiciones de temperatura constante del sólido y encontraron que manteniendo la temperatura del sólido fija en 35 °C y 50 °C las curvas de secado son similares a las resultantes del secado con aire a temperatura constante de 50 y 70 °C respectivamente.

Braga et al. (2009) estudiaron la cinética de secado de ananá a 40 y 60 °C, con velocidad de aire de 0.42 y 0.84 m/s, en atmósfera modificada con 0.5 % de etanol. En este trabajo se muestra que las variables de mayor incidencia son la temperatura y la velocidad del aire, en ese orden. El agregado de etanol afecta poco los resultados de velocidad de secado de ananá.

Dos modelos matemáticos para predecir la cinética de secado de ananá fueron propuestos por Simal et al. (2006). Un modelo supone que el coeficiente de difusión aparente es función de la temperatura y el otro modelo asume que dicho coeficiente depende de la temperatura y la humedad de la muestra. Dicho trabajo muestra que la incorporación de la humedad como variable en la ecuación de difusión mejora la simulación del proceso.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Preparación de la muestra**

Se trabajó con frutas de *Ananas Comosus variedad Cayena Lisa* en grado de madurez comercial y textura aún firme, obtenida en locales comerciales. Las frutas fueron lavadas con abundante agua, peladas manualmente y cortadas en medias rodajas de  $0.60 \pm 0.05$  cm de espesor y  $11.5 \pm 0.5$  cm de diámetro; con un sacabocados se les retiró el centro.

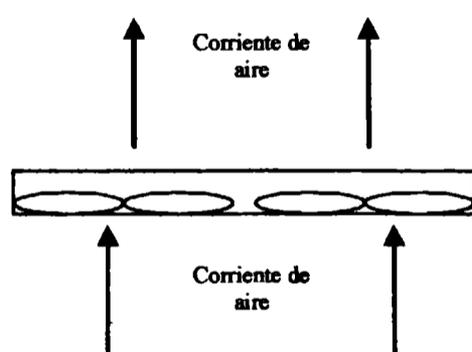
Debido a que existe variación en el contenido de algunos nutrientes entre la base y la parte superior de la fruta (Miller & Hall, 1953), se descartaron los extremos utilizándose la parte media del ananá con el objetivo de disminuir la variabilidad natural del tejido.

## 2.2 Procedimiento de secado

Los ensayos de secado se realizaron en un secadero de flujo transversal bajo condiciones constantes de velocidad de aire (1.5 m/s) y temperatura (45, 60, 75 °C). En cada ensayo, las rodajas de ananá se colocaron dentro de dos cestas de aluminio evitando el contacto entre los trozos de fruta (Figura II.1). A tiempos pre-establecidos, se retiró una cesta del secadero y se registró su peso para la elaboración de las curvas de secado; de la otra cesta se extrajeron cuatro muestras a las cuales se les midió el espesor con un calibre manual sobre tres puntos en cada muestra y los valores del color  $L$ ,  $a$  y  $b$ ; de inmediato las mismas muestras se fraccionaron en dos partes: a una se le determinó la humedad y a la otra, el contenido de ácido ascórbico, ambas determinaciones por duplicado.

Las muestras para los ensayos de rehidratación se retiraron al final del proceso de secado o a los tiempos preestablecidos a tal fin.

Se realizaron tres ensayos de secado de medias rodajas de ananá a cada temperatura, registrándose valores del contenido de humedad que variaron entre 750 % y 23 % en base seca, y tiempos de secado entre 150 y 430 minutos.



**Figura II 1.** Esquema de la ubicación de medias rodajas de ananá en la corriente de aire durante el secado

## **2.3 Consideraciones teóricas del proceso de secado.**

### **2.3.1 Curvas de velocidad de secado**

La transferencia de humedad en materiales biológicos durante el secado tiene lugar en dos etapas sucesivas: desde el interior hacia la superficie (transferencia interna de humedad) y evaporación desde la superficie hacia el aire (transferencia superficial de humedad). Si la velocidad de la transferencia interna de humedad es igual o mayor que la velocidad de la transferencia superficial de humedad el proceso transcurre en un período de velocidad constante de secado (CRP). Si la velocidad de transferencia interna de humedad es menor que la velocidad de transferencia superficial el proceso transcurre en un período de velocidad decreciente (FRP). Dependiendo de las propiedades del material y del aire, el secado de productos frutihortícolas pocas veces presentan ambos períodos, CRP y FRP. Así, si bien el CRP puede presentarse durante el secado de frutas y hortalizas a muy baja velocidad del aire, raramente ha sido observado durante el secado de material biológico (Nogueira, 1991); el CRP está presente pero poco definido durante el secado de láminas de puré de manzanas y de tomates a 60 °C (Semhan et al., 2004) y es inexistente en el secado de bananas con flujo de aire de 3.3 m/s y temperaturas alrededor de 60°C (Demirel & Turham, 2003).

Durante el período de velocidad de secado decreciente predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. Es en esta etapa de secado donde cobra mayor importancia la simulación del proceso mediante la teoría de difusión molecular del agua. La migración por difusión de la humedad contenida en un alimento es el mecanismo predominante en el secado de la mayoría de los productos alimenticios, principalmente en los vegetales (Geankoplis, 1983).

### **2.3.2 Segunda Ley de Fick: difusión a través de sólidos porosos**

#### **2.3.2.1 Modelo 1: espesor constante**

El modelo físico puede describirse en base a las siguientes suposiciones:

1. Producto: material sólido, homogéneo y uniforme, cuya geometría se asimila a una placa plana infinita de espesor  $e$
2. el movimiento de humedad es unidimensional

3. las propiedades fisicoquímicas del producto permanecen constantes durante el proceso
4. la temperatura del sólido permanece constante e igual a la del aire durante el proceso
5. el material es considerado una delgada placa de espesor inicial  $e_0 = 2l$ . Los dos lados de la placa son expuestos a una corriente de aire uniforme a temperatura  $T$  constante durante todo el proceso
6. resistencia externa a la transferencia de masa despreciable
7. no se producen cambios de volumen en las rodajas de fruta durante el proceso de secado ( $e = \text{constante}$ )

Considerar el secado un mecanismo de difusión unidimensional es una suposición frecuente en estudios de deshidratación de frutas y hortalizas tales como bananas (Karim & Hawlader, 2005) y zapallo (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006). Se realizó una evaluación teórica previa (y aproximada) basada en las consideraciones deducidas de la publicación de Turhan & Erdoğan (2003), en el tamaño y la forma de nuestras muestras y los valores experimentales de  $D_{ef}$  del agua durante el secado de ananá. Estos cálculos demuestran que la suposición de la geometría plana de la placa introduce un error relativo en los valores de humedad predichos inferiores al 1 % durante las primeras 10 horas del proceso a 75 °C, que se extiende a 20 horas a 45 °C.

En los procesos en los que ocurre transferencia simultánea de masa y calor en el producto, como es el secado, uno de los números adimensionales que caracterizan el sistema es el Número de Lewis,  $Le = \alpha/D$ , que representa la relación entre el mecanismo de difusión de calor y el mecanismo de difusión de masa (Gekas, 2000). Si el  $Le > 60$  el perfil de temperatura puede considerarse inapreciable comparado con el gradiente de masa generado en el material, por lo cual la transferencia de materia sería el mecanismo dominante del proceso (Demirel & Turham, 2003). A partir del modelo planteado por Choi & Okos (Gekas, 2000) y la composición del ananá se pudo estimar que el valor de la difusividad térmica (en el orden de  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ); en tanto que el coeficiente de difusividad del agua resultante de la aplicación de la solución analítica de la Segunda Ley de Fick a nuestros datos experimentales está en el orden de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Estos valores indicarían un predominio

del mecanismo de difusión interna de materia respecto al mecanismo de difusión interna de calor y se justificaría así la suposición 4 del modelo.

Considerando las simplificaciones y observaciones del modelo antes detalladas, la variación del contenido de agua  $W$  en kg/kg de sólido seco (base seca) dentro de la rodaja de ananá durante el secado puede ser considerado un fenómeno de difusión unidimensional descrito por la Segunda Ley de Fick de la difusión (Crank, 1975):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (II.1)$$

Donde:

- $W$  = contenido de agua
- $D_{ef}$  = coeficiente de difusión efectivo o aparente
- $t$  = tiempo
- $x$  = distancia desde el centro de la placa

Condiciones iniciales y de contorno:

- la concentración de agua en las rodajas de ananá a tiempo cero es  $W_0$  (distribución uniforme de humedad)

$$W = W_0 \quad -l < x < l \quad t = 0$$

- la concentración de agua en la superficie de las rodajas de ananá a cualquier tiempo es igual a la concentración en el equilibrio  $W_e$

$$W = W_e \quad x = \pm l \quad t > 0$$

Esta condición implica que en la superficie de los trozos de fruta, la humedad de equilibrio se alcanza de forma instantánea.

La solución de la Ecuación II.1 promediada en el volumen para una placa plana (Crank, 1975), puede escribirse:

$$\frac{\bar{W} - \bar{W}_e}{\bar{W}_0 - \bar{W}_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-D_{ef}(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t\right\} \quad (II.2)$$

$l = e/2$  medio espesor de la rodaja de ananá

$\bar{W}$  = contenido medio de agua en la fruta a tiempo  $t$

$\bar{W}_0$  = contenido medio de agua en la fruta a tiempo  $t = 0$  (contenido inicial de humedad)

$\bar{W}_e$  = contenido medio de agua en la fruta a tiempo  $t = \infty$ , cuando se alcanza el equilibrio

Versiones aproximadas de esta solución han sido utilizadas en numerosos estudios de deshidratación de alimentos (Zogzas & Maroulis, 1996; Sander et al., 1998; Feng et al., 2000; Varadharaju et al., 2001; Karatas & Pinarh, 2001).

Una característica importante de esta serie (Ecuación II.2) es que los exponenciales tienden rápidamente a cero a medida que crece el tiempo, por lo que los métodos simplificados obvian los términos de orden superior. Para ilustrar la convergencia de la serie, si se asigna al producto  $D_{ef} (\pi/2l)^2$  un valor de  $10^{-3} \text{ min}^{-1}$  (valor típico de la difusión del agua en alimentos durante procesos de deshidratación) se observa que el segundo término de la serie es aproximadamente el 10 % del primer término aún para valores pequeños del tiempo (10 minutos). En el presente trabajo se tomaron los cinco primeros términos de la serie para la cuantificación del coeficiente de difusión.

Por regresión no lineal de los resultados experimentales expresados como  $\frac{\bar{W} - \bar{W}_e}{\bar{W}_0 - \bar{W}_e}$  versus el tiempo se calcularon los valores de  $D_{ef}$ .

Los valores de  $W_e$  utilizados en los cálculos se cuantificaron experimentalmente, dejando las muestras secar por aproximadamente 48 h a la temperatura correspondiente (45, 60 ó 75 °C). Estos datos experimentales se cotejaron con los publicados por Hossain et al. (2001), como isotermas de sorción de *Anana comosus* a 20, 30, 40 y 50 °C.

### 2.3.2 Modelo 2: espesor variable con el contenido de agua del vegetal

El encogimiento de los vegetales durante el secado puede tener un efecto significativo sobre el cálculo de la velocidad de remoción de humedad y es necesario incluir este efecto en el modelo. A tal fin se plantea un modelo físico-matemático bajo las mismas suposiciones que el modelo anterior modificando la condición 7, de la siguiente manera:

7. el alimento es considerado un sólido poroso homogéneo, cuyo cambio de volumen se debe a la pérdida de agua y está expresado por la Ecuación II.11.

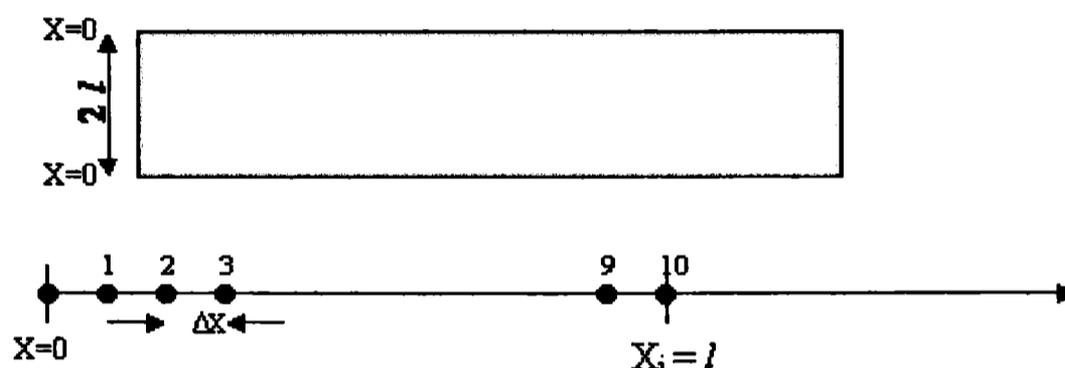
Una solución rigurosa la Ley de Fick considerando el fenómeno de encogimiento del sólido durante el secado solo puede obtenerse mediante métodos numéricos.

Para incluir el fenómeno de contracción observado durante el secado de la fruta (Ecuación II.11) se resolvió la ecuación diferencial de la 2da Ley de Fick aplicando una técnica de

aproximación numérica: el método explícito de diferencias finitas (Burden & Faires, 1985; Chapra & Canale, 1989). En el modelo planteado se incorpora el encogimiento en el valor de  $\Delta x_i^t$ . Esto es, el cálculo numérico se realizó suponiendo al sólido dividido en veinte hojas de espesor variable.

### Formulación en diferencias finitas

La mitad del espesor de las muestras (a  $t=0$ ,  $l=0.3$  cm) se discretizó espacialmente con un tamaño de malla  $\Delta x = l/10$  y en la dirección del tiempo con un tamaño de paso de  $\Delta t = 0.5$  minutos.



**Figura II. 2.** Esquema de una media rodaja de ananá y discretización de la coordenada espacial con ancho de malla  $\Delta x$ .

La Ecuación II.1 se resolvió a través de la técnica de aproximación numérica de diferencias finitas, con condiciones inicial y de borde:

$$W_i^0 = W_0$$

$$W_{\text{sup}}^t = W_e = W_{\text{sup}}$$

La derivada segunda es representada por una diferencia dividida central en las ecuaciones de los nodos internos de la grilla:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{W_{i+1}^t - 2W_i^t + W_{i-1}^t}{\Delta x^2} \quad (\text{II.3})$$

Para aproximar la derivada en el tiempo se usa una diferencia dividida hacia adelante:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{W_i^{t+\Delta t} - W_i^t}{\Delta t} \quad (\text{II.4})$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación balance de la Segunda Ley de Fick (Ec. II.1) se tiene:

$$D_{ef} \frac{W'_{i+1} - 2W'_i + W'_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{W'^{i+\Delta t} - W'_i}{\Delta t} \quad (II.5)$$

que puede ser resuelta para:

$$W'^{i+\Delta t} = W'_i + \lambda (W'_{i+1} - 2W'_i + W'_{i-1}) \quad (II.6)$$

donde  $\lambda = D_{ef} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$  ; el método explícito es convergente y estable si  $\lambda \leq 0.5$ , o sea los

valores de paso en el tiempo están limitados a :  $\Delta t \leq 0.5 \frac{(\Delta x)^2}{D_{ef}}$

Estas ecuaciones proporcionan un medio explícito para calcular los valores del contenido de agua en cada nodo para un tiempo posterior, en base a los valores de humedad actuales. Las ecuaciones nodales resultantes son:

Nodo 1:

Para el balance en este nodo, se aplica a la derivada espacial la diferencia hacia adelante:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{W'_2 - 2W'_1 + W'_{sup}}{\Delta x^2} \quad (II.7)$$

combinando las ecuaciones II.4 y II.7 se obtiene:

$$W'^{1+\Delta t} = W'_1 + \lambda (W'_2 - 2W'_1 + W'_{sup}) \quad (II.8)$$

Nodos 2-9:

A partir las ecuaciones II.4 y II.3 se obtiene:

$$W'^{i+\Delta t} = \lambda (W'_{i+1} - 2W'_i + W'_{i-1}) + W'_i \quad (II.9)$$

Nodo 10:

A partir las ecuaciones II.4 y II.3 y de la condición de simetría:  $W'_9 = W'_{11}$  se obtiene:

$$W'^{10+\Delta t} = \lambda (2W'_9 - 2W'_{10}) + W'_{10} \quad (II.10)$$

El subscrito  $i$  señala en número correspondiente al nodo en cuestión y el sobrescrito  $\Delta t$  señalan paso en el tiempo.

En el presente trabajo, este sistema de ecuaciones se utiliza para evaluar el  $D_{ef}$  de acuerdo al siguiente procedimiento de cálculo:

1. se supone un valor de  $D_{ef}$  (en base a los resultados obtenidos por regresión no lineal de la solución analítica de la segunda Ley de Fick, con espesor constante)
2. se calculan los valores de contenido de agua en cada nodo y a cada tiempo, a partir de las Ecuaciones II.8, II.9 y II.10
3. se calcula el valor medio del contenido de agua en todo el espesor de la muestra y se comparan con los resultados experimentales de humedad media en la muestra a

través del error relativo porcentual ( $E_{rp}$ ) a cada tiempo 
$$E_{rp} = \left| \frac{\bar{W}'_{exp} - \bar{W}'_{calc}}{\bar{W}'_{exp}} \right| * 100$$

4. se repite el cálculo con otro valor de  $D_{ef}$  hasta lograr el mínimo error relativo promedio porcentual ( $E_{pp}$ ). Ese valor de  $D_{ef}$  se considera aceptable.

El efecto del encogimiento de la matriz vegetal durante el secado se incorpora en las ecuaciones a través de los valores de  $\Delta x$  variable en cada iteración con el contenido de agua del nodo en cuestión. Esta metodología permitió, además de incorporar el fenómeno del encogimiento en el modelo matemático, obtener un perfil aproximado del contenido de agua en el sólido a cada tiempo. Esto último se utilizó en el algoritmo de cálculo del contenido de ácido ascórbico durante el secado.

#### 2.4 Variación del volumen

Se midió el espesor de las medias rodajas de ananá con un calibre manual sobre cuatro muestras a distintos tiempos de secado, a las tres temperaturas de trabajo. Las mediciones fueron realizadas tan rápidamente como fuera posible, para no afectar el proceso. El espesor fue expresado como la relación del valor medido a cada tiempo respecto al valor inicial ( $e/e_0$ ).

La contracción durante el secado puede ser representada como una función de la humedad (Suzuki et al., 1976; Lozano et al., 1983; Lang et al., 1994; Raghavan & Venkatachalapathy, 1999; Hernandez et al., 2000, Mayor and Sereno, 2004). Hernandez et

al. (2000) propusieron la siguiente función lineal para relacionar el encogimiento con la humedad del sólido:

$$\frac{e}{e_0} = e^{-\eta e_0} + (1 - e^{-\eta e_0}) \frac{W}{W_0} \quad (II.11)$$

Esta ecuación señala que:  $e=e_0$  cuando  $W=W_0$ ;  $e = e^{-\eta e_0} e_0$  cuando  $W=0$ . Estas condiciones indican que el término  $e^{-\eta e_0}$  simboliza la fracción del espesor inicial que presenta la muestra de fruta cuando el secado se extiende hasta  $W=0$ . Debido a que durante el secado  $W$  tiende asintóticamente a  $W_e$  este valor ( $W=0$ ) nunca se alcanza y la ecuación es consistente en el rango de humedades abarcado por el secado (Hernandez et al., 2000).

El parámetro  $\eta$  se evaluó por análisis de regresión de la Ecuación II.11 con los datos experimentales obtenidos durante el secado de medias rodajas de ananá.

Los resultados obtenidos con este modelo se compararon con aquellos obtenidos mediante el típico modelo lineal del tipo:

$$\frac{e}{e_0} = A + B \frac{W}{W_0} \quad (II.12)$$

Para evaluar la influencia de la temperatura sobre la velocidad de variación de volumen se analizaron individualmente los resultados experimentales obtenidos a cada temperatura de secado.

Se registró el cambio en el área transversal de las medias rodajas de ananá al cabo de 3.5 h de secado a 60 °C y 3 h a 75 °C. Para ello se dibujó el contorno del sólido sobre papel (cinco muestras por vez), se recortó el papel sobre ese contorno y se registró el peso de cada uno de ellos. Luego se relacionó este valor con el peso de una sección del mismo papel de área conocida (100 cm<sup>2</sup>) para estimar el área de las muestras, considerando relación directa entre área y masa del papel. Se repitió este proceso al inicio y al final del período de secado.

### 2.3 Determinación del contenido de agua

El contenido de agua se cuantificó mediante la pérdida de peso por desecación en estufa de a 70 °C hasta pesada constante (aproximadamente 48 horas).

## 2.4 Degradación del ácido ascórbico

### 2.4.1 Cuantificación de ácido ascórbico

Proceso de Extracción: Cada muestra fue pesada (valores comprendidos entre 5 y 8 g) y triturada en un mortero de porcelana durante 5 minutos, con la adición, en forma gradual, de 50 ml de solución buffer (pH 2.5). Esta mezcla se transfirió a un vaso de vidrio oscuro, se sometió a ultrasonido por 10 minutos, se filtró y, de inmediato, se inyectó al cromatógrafo.

Cuantificación del ácido L-ascórbico: se llevó a cabo mediante cromatografía líquida (HPLC), con columna Alltima C-18 (250 mm x 4.6 mm, 5 µm de tamaño de partícula) y detector UV ( $\lambda = 254$  nm). Se utilizó una fase móvil formada por buffer (fosfato de potasio 0.02M, pH=2.5 ajustado con ácido fosfórico): acetonitrilo (98:2 v/v) a una velocidad de flujo de 1.0 mL/min. La identificación y cuantificación se realizó por comparación del tiempo de retención y magnitud del área del pico con un estándar de referencia.

Standard de referencia: las muestras estándar de ácido L-ascórbico se prepararon diluyendo 100 mg de ácido L-ascórbico (A-0278, SIGMA) en 100 mL de buffer; posteriormente esta solución se diluyó 1/10, 1/50 y 1/100. Se inyectaron 10 µL de cada una de estas soluciones para verificar que la relación concentración-área mantiene comportamiento lineal en este rango de concentraciones. Se tomó como referencia el área obtenida con la inyección de 10 µL de estándar concentración 0.02 mg/mL (técnica de patrón externo); se cuantificó el área de referencia al iniciar y al finalizar cada sesión de cromatografía.

Los análisis en todos los casos se realizaron por duplicado y los resultados que se exponen son los valores medios.

### 2.4.2 Simulación de la degradación del ácido ascórbico durante el secado a 45 °C

La simulación de la pérdida de ácido l-ascórbico se efectuó suponiendo, en condiciones estacionarias, una cinética de degradación de primer orden:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (II.13)$$

La cinética de degradación del ácido ascórbico en *Anana comosus*, en condiciones de humedad y temperatura constante, fue estudiada por Pardo Sedas et al. (1994). Los autores

determinaron los valores de  $k$  (constante de velocidad) durante el almacenamiento a tres temperaturas (30, 35 y 40 °C) y tres valores de  $a_w$  (0.92, 0.95 y 0.97). Mediante análisis de regresión obtuvieron una ecuación empírica de  $k$  como una función de la actividad acuosa y de la temperatura (Ecuación II.18). Esta ecuación fue utilizada en la simulación de la degradación de la vitamina C durante el secado a 45 °C.

Las ecuaciones empíricas resultantes de la aplicación de herramientas estadísticas (análisis de regresión, superficies de respuesta, etc.) son estrictamente válidas dentro del rango de las variables aplicado en el estudio. Debido a ello no se consideró apropiado aplicar la Ecuación II.18 a los resultados de retención de vitamina C durante el secado a 60 y 75 °C.

Durante el secado, se registraron los datos de contenido de agua en la fruta en función del tiempo. Hossain et al., 2001, determinaron las isotermas de sorción para *Anana comosus* a 20, 30, 40 y 50 °C, encontrando que las mismas presentan buen ajuste al modelo de BET modificado. Estas isotermas fueron utilizadas para evaluar el  $a_w$  correspondiente a cada tiempo en función al contenido medio de humedad durante el secado (Planteo I).

El procedimiento de cálculo seguido para estimar la retención de ácido ascórbico durante el secado de medias rodajas de ananá es presentado en la Figura II.3. En este algoritmo, la Ecuación II.13 se resolvió numéricamente aplicando un método de Runge-Kutta de segundo orden (Método de Ralston, que es el mas exacto de los métodos de Runge-Kutta de segundo orden), con  $h = \Delta t = 3$  minutos.

$$C_{i+1} = C_i + \left( \frac{1}{3}k_1 + \frac{2}{3}k_2 \right)h \quad (II.14)$$

donde:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_i, C_i) \\ k_2 &= f(t_i + 3/4h; C_i + 3/4k_1 h) \end{aligned} \quad (II.15)$$

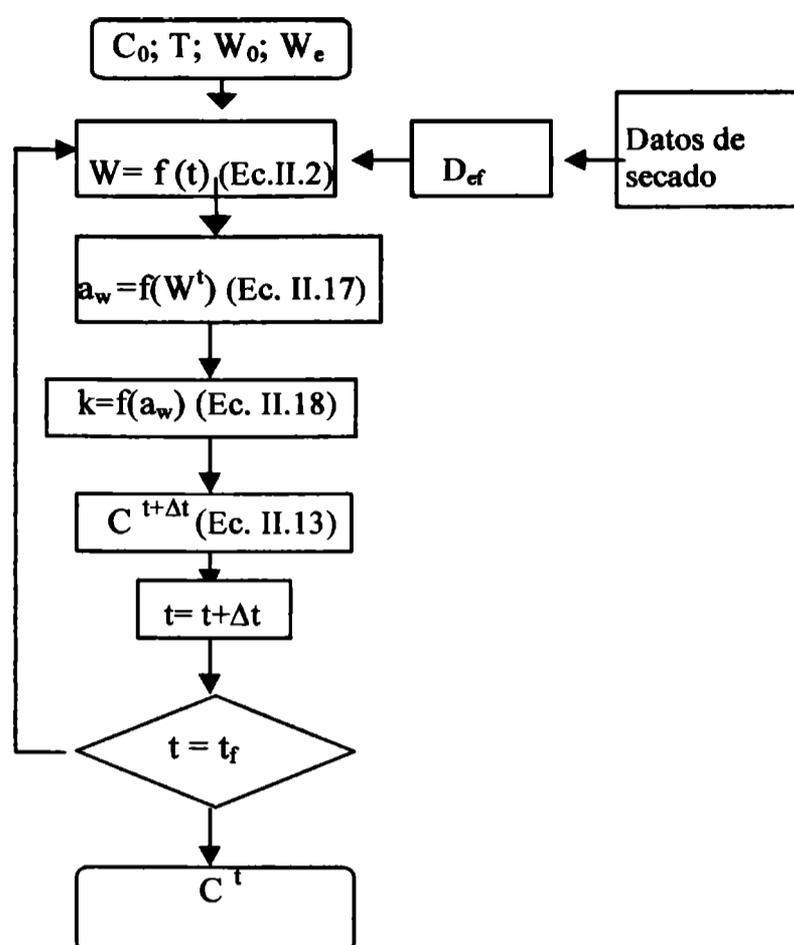
La capacidad de predicción del modelo se analizó comparando los resultados predichos con los valores experimentales del contenido medio de AA a diferentes tiempos, a través del error promedio porcentual de la estimación ( $E_{pp}$ ).

$$E_{pp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\bar{C}_{exp} - \bar{C}_{estimado}}{\bar{C}_{exp}} \right| * 100 \quad (II.16)$$

**Tabla II.1:** Ecuaciones utilizadas en la simulación de la degradación del ácido ascórbico durante el secado de medias rodajas de ananá.

Referencia	Expresión matemática	
Crank, 1975	$\frac{\bar{W} - \bar{W}_e}{\bar{W}_0 - \bar{W}_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-D_{ef} (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t\right\}$	(II.2)
Cinética de degradación	$\frac{dC}{dt} = -k C$	(II.13)
Hossain et al., 2001	$W_e = \frac{21.579 - 0.2264T}{(1 - (0.6809 + 0.0024T)a_w)}$	(II.17)
Pardio Sedas et al., 1994	$k = \left(7 a_w^2 - 13.29 a_w + 6.396\right) \frac{1}{1440}$	(II.18)

Este primer modelo (**Planteo I**) no considera el perfil de humedad generado en el interior de la muestra durante el proceso de secado. Sabiendo que durante el proceso de secado de alimentos de alta humedad se genera un perfil de humedad en el interior del producto (Srikiatden & Roberts, 2006) y tomando en consideración que la constante cinética de degradación del ácido ascórbico es función de la actividad acuosa y por lo tanto es sensible al contenido de agua, se plantea un segundo modelo de cálculo (**Planteo II**) que utiliza las diferencias divididas finitas para simular el perfil de humedad en el interior del alimento y sobre dicho perfil se aplica el esquema de cálculo de degradación de AA. En otras palabras, la principal diferencia con el **Planteo I** es que, a cada tiempo, se evalúa la concentración de vitamina C en cada sub-volumen, con el valor de contenido de agua resultante de la simulación numérica; luego se promedia el contenido del nutriente en todo el espesor de la muestra, a cada tiempo. Este modelo asume temperatura constante durante el proceso.



**Figura II .3.** El diagrama de bloque muestra la metodología de cálculo utilizada para predecir la concentración del ácido ascórbico durante el secado de rodajas de ananá.

En el **Planteo II**, se discretiza el sólido en la dirección de la difusión, se calcula la humedad (Ec. II.1) expresada en diferencias finitas y la concentración de ácido ascórbico en cada nodo; finalmente, el promedio de estos valores se compara con los resultados experimentales a los tiempos correspondientes. La media rodaja de ananá se discretizó en un arreglo de 20 nodos de 0.03 cm y el incremento del tiempo utilizado fue de 0.5 minutos. Utilizando las ecuaciones de la Tabla II.1 y el perfil aproximado del contenido de agua en el sólido a cada tiempo (Ecuaciones II.8, II.9 y II.10), aplicando el esquema de cálculo de la Figura II.3, se obtienen datos del contenido de ácido ascórbico en cada nodo en función del tiempo. Estos valores se promedian sobre todo el espesor de la muestra y se comparan con los resultados experimentales del contenido de ácido ascórbico durante el secado de medias rodajas de ananá a 45 °C.

## **2.5 Cambios del color**

### **2.5.1 Medidas instrumentales del Color**

La lectura instrumental del color se realizó con un Colorímetro Triestímulo HunterLab® D25A-9, usando un área de apertura iluminada de 5 cm de diámetro. El equipo fue calibrado antes de cada lectura con un plato de cerámica blanco ( $x=82.43$ ,  $y=84.55$ ,  $z=99.39$ ) y uno negro ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ ).

Las medias rodajas de ananá se ubicaron dentro de una caja de Petri de 6 cm de diámetro y 1 cm de profundidad, superponiendo los trozos de manera tal de cubrir completamente la superficie, generando así un lecho que actúa como un sólido opaco. Durante la lectura, el recipiente conteniendo las muestras se cubrió con una caja cilíndrica negra. Se obtuvieron valores triestímulo equivalentes en mediciones previas con y sin cobertor negro, lo cual garantizó el comportamiento del sistema como el de un sólido opaco. La iluminación se realizó a través del fondo del recipiente conteniendo las muestras.

Cada medida se registró como la media de cuatro lecturas sobre una misma muestra, rotando el recipiente  $90^\circ$  entre cada lectura. A tiempo cero (fruta fresca) las mediciones se realizaron por triplicado, tomando muestras de diferentes sectores de la fruta.

Se obtuvieron los valores triestímulo X, Y, Z del espacio CIE y sus correspondientes  $a$ ,  $b$ ,  $L$  de la escala Hunter.

### **2.5.2 Parámetros de color seleccionados para analizar cambios durante el secado**

Los cambios de color en los sistemas alimenticios dependen, esencialmente, de su compleja composición química (tipos de enzimas presentes, contenido de azúcares y aminoácidos, contenido de agua, grado de acidez, tipos de pigmentos, etc.) y de factores externos tales como la temperatura de procesamiento. La combinación de estos factores determinan la naturaleza del cambio de color, encontrándose que el deterioro del color durante el calentamiento de pulpa de frutas puede deberse a reacciones de pardeamiento no enzimático que involucran aminoácidos y azúcares reductores (Lozano & Ibarz, 1997), destrucción de pigmentos naturales en las frutas (Zanoni et al, 1999; Maskan, 2006), reacciones de pardeamiento enzimático (Waliszewski et al., 1999, Mandala et al., 2005), entre otros. Estas reacciones junto a modificaciones de la estructura física del tejido vegetal, generadas durante el secado, son responsables de cambios en la apariencia de la

fruta que se perciben principalmente a través del color. La selección de parámetros y funciones de color que representen adecuadamente estos cambios es una etapa importante en seguimiento de la calidad sensorial durante el secado de las frutas.

En el presente estudio se utilizaron los siguientes parámetros del color:

- Ángulo hue =  $\tan^{-1}(b/a)$
- Chroma =  $(a^2 + b^2)^{1/2}$

## 2.6 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la fruta fresca y procesada se evaluaron a través de ensayos de compresión uniaxial de cilindros de ananá de 25 mm de diámetro y altura variable con la humedad de la fruta (de 3 a 6 mm), utilizándose a tal fin un Texturómetro Universal (TA-XT2i Texture Analyser). La metodología es descrita con detalle en el *Capítulo III: Deshidratación Osmótica*.

## 2.7 Rehidratación

### 2.7.1 Metodología experimental

Los ensayos de rehidratación se llevaron a cabo sobre medias rodajas de ananá al final del proceso de secado. Cada muestra (una media rodaja de ananá deshidratado) se colocó en un vaso de precipitado conteniendo 150 ml de agua desmineralizada a la temperatura prevista para el ensayo; el recipiente se colocó sobre el plato termostatzado de un agitador magnético, se cubrió con papel de aluminio y se mantuvo el sistema con agitación durante todo el ensayo. A intervalos de tiempo predeterminados se extrajo una muestra, se le retiró el exceso de agua superficial con papel de filtro y se registró el peso. Este procedimiento se repitió hasta observar pesada constante por un período de inmersión de aproximadamente 15 minutos.

Cada experimento de rehidratación fue replicado y se registró la evolución del peso de la muestra durante cada experiencia. El agua contenida en la fruta durante la rehidratación se determinó en función del contenido de humedad inicial (final del secado) y el aumento de peso, expresada como masa de agua por 100 g de materia seca.

Se escogieron temperaturas bajas para estudiar la rehidratación de la fruta debido a que se prevé una aplicación final del ananá deshidratado en desayunos, adicionado a leche o

yogurt, y en la elaboración de postres donde el proceso de rehidratación se efectúa a bajas temperaturas y en tiempos cortos.

Existen numerosos trabajos científicos donde los autores miden la habilidad de rehidratación del material seco; sin embargo no hay consistencia en el procedimiento aplicado ni en la nomenclatura utilizada en los diferentes trabajos (Lewicki, 1998).

Para cuantificar la capacidad de rehidratabilidad del ananá deshidratado se emplearon dos coeficientes: la *relación de rehidratación* (RR) y el *coeficiente de rehidratación* (COR).

La relación de rehidratación se define como la relación de la masa de la muestra rehidratada a la masa de la muestra seca (Wang & Chao, 2003), sin embargo Krokida & Marinou-Kouris (2003) expresan este parámetro en términos del contenido de agua de las muestras:

$$RR = \frac{(100 + X_{rh})}{(100 + X_{dh})} \quad (II.19)$$

El coeficiente de rehidratación, que nos indica el grado de recuperación de peso respecto al producto fresco, se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (Prabhanjan et al., 1995; Khraisheh et al., 2004):

$$COR = \frac{m_{rh}(100 - X_0)}{m_{dh}(100 - X_{dh})} \quad (II.20)$$

donde:  $m_{rh}$  es la masa de la muestra rehidratada (g),  $m_{dh}$  es la masa de la muestra deshidratada (g);  $X_{rh}$  es el contenido de agua de la muestra durante la rehidratación (% base húmeda);  $X_{dh}$  es el contenido de agua de la muestra al final del secado (% base húmeda);  $X_0$  es el contenido de agua de la fruta fresca, previo al secado (% base húmeda).

### 2.7.2 Metodología de cálculo

Se utilizó el modelo de Page para describir la ganancia de agua del ananá deshidratado durante el proceso de rehidratación en agua a temperatura constante. Este modelo está basado en las siguientes suposiciones:

- La temperatura del agua es constante durante la rehidratación
- El contenido de agua inicial de las muestras es uniforme

La Ecuación II.21 fue desarrollada para explicar la pérdida de agua durante el secado en capa fina (Page, 1949).

$$MR = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \exp(-K t^N) \quad (II.21)$$

El contenido de agua de equilibrio,  $W_e$ , del producto en las condiciones del proceso puede ser tomado como el contenido de agua al final del proceso ( $W_f$ ). Estas modificaciones fueron aplicadas para el secado de arroz por Ramesh & Rao (1996), de donde:

$$MR = \frac{W - W_f}{W_0 - W_f} = \exp(-K t^N) \quad (II.22)$$

Se consideró conveniente aplicar la Ecuación II.22 al proceso de rehidratación de medias rodajas de ananá deshidratado. Donde  $W_0$  representa la humedad de la fruta (% base seca) al inicio del proceso de rehidratación (final del secado) y  $W$ , la humedad del alimento a cada tiempo.

Las curvas de  $\ln(MR)$  como una función del tiempo de inmersión fueron construidas a partir de los datos experimentales y los valores de K y N se determinaron mediante análisis de regresión de la Ecuación II.23:

$$\ln(MR) = -K t^N \quad (II.23)$$

Donde K se definió como la pendiente de la recta resultante y N fue el parámetro de ajuste; resultando aquel valor de N que arrojase el mejor valor de coeficiente de correlación ( $r^2$ ).

Finalmente, se efectuaron ensayos de rehidratación sobre muestras de ananá deshidratado, resultante de experiencias de secado diferentes a las utilizadas para determinar los valores de N y K. El criterio aplicado para evaluar la bondad de la estimación fue el error promedio porcentual ( $E_{pp}$ ). Donde  $n$  es el número de datos experimentales,  $W_{exp}$  y  $W_{estimado}$  es el valor de humedad medido experimentalmente y estimado a través de la ecuación del modelo, respectivamente.

$$E_{pp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{W_{exp} - W_{estimado}}{W_{exp}} \right| * 100 \quad (II.24)$$

### 3. Resultados experimentales

#### 3.1 Variación del volumen

Los resultados experimentales de la variación del espesor de las medias rodajas de ananá durante la deshidratación fueron ajustados a dos modelos seleccionados de la literatura, a los efectos de distinguir el modelo empírico que mejor describa la relación del encogimiento con la variación de humedad durante el secado de la fruta.

Mediante ajuste del modelo lineal (Ec. II.12), se analizaron individualmente los resultados experimentales obtenidos a cada temperatura y se encontró que no existen diferencias significativas, en el rango de 45 a 75 °C, estableciéndose de esta manera que la ecuación lineal que mejor representa el comportamiento del sistema, con un coeficiente de correlación para esta regresión de 0.9487, es la siguiente:

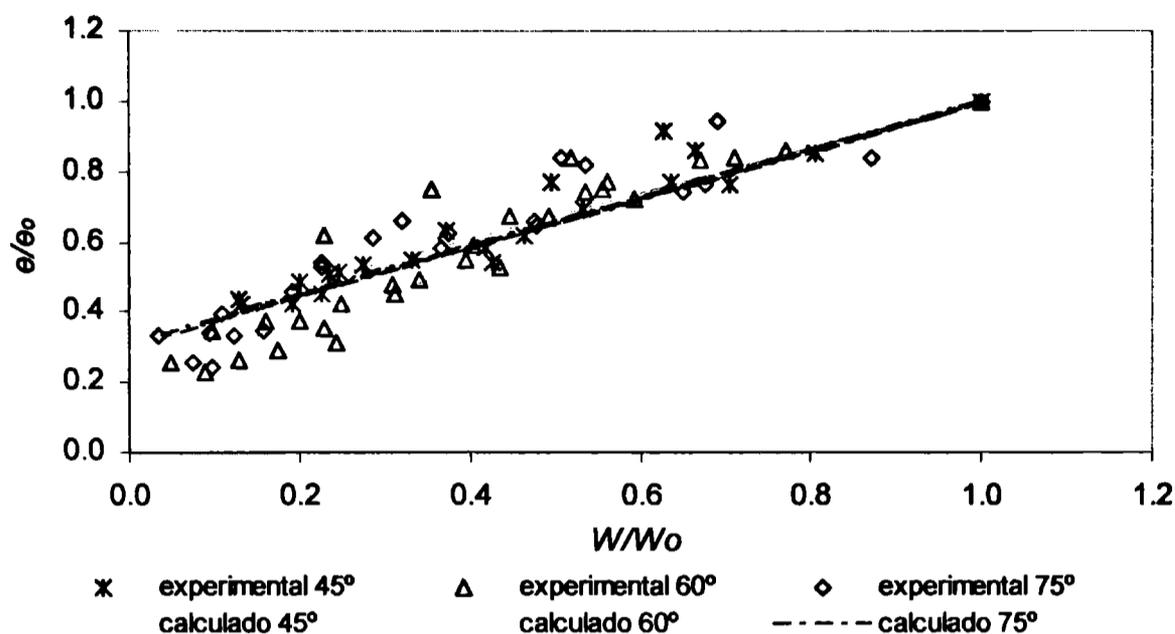
$$e/e_0 = 0.3047 + 0.7323 W/W_0 \quad (II.25)$$

Para aplicar el modelo propuesto por Hernandez et al. (2000), se valuó el parámetro  $\eta$  a través del ajuste de la Ecuación II.11 a los resultados experimentales obtenidos durante el secado de las medias rodajas de ananá (Figura II.4). En la Tabla II.2 se muestran los valores de  $\eta$  a cada temperatura junto al error relativo porcentual promedio de la estimación ( $E_{PP}$ ) del espesor a cada temperatura. A modo comparativo se incluyó en esta tabla los valores del  $E_{PP}$  resultantes de la aplicación del modelo lineal (Ec. II.25)

**Tabla II.2.** Valores del parámetro empírico  $\eta$  y  $E_{PP}$  de la estimación del espesor resultantes de los dos modelos aplicados.

Temperatura, °C	$\eta$	$E_{PP}$ (Ec. II.11), %	$E_{PP}$ (Ec. II.25), %
45	1.76	5.025	5.348
60	2.56	11.362	12.235
75	1.95	11.501	11.858

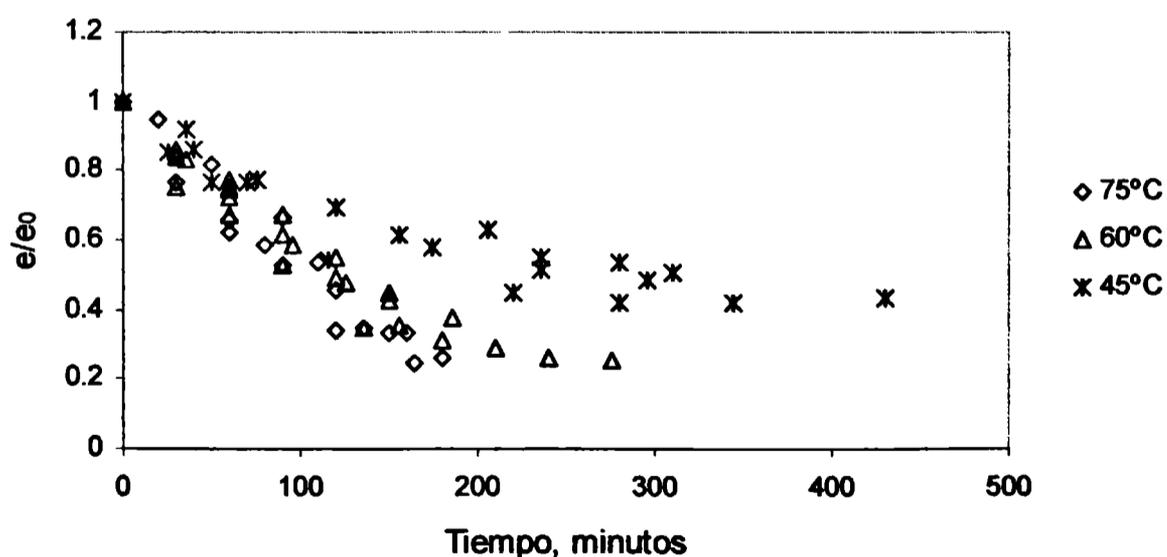
En función a los resultados expuestos, se considera apropiado el uso del modelo descrito con la Ecuación II.11 para expresar los cambios de espesor que afectan a las medias rodajas de ananá durante el secado en aire caliente, con el valor de  $\eta$  correspondiente a la temperatura del ensayo.



**Figura II.4.** Variación del espesor relativo con la humedad adimensional durante el secado a diferentes temperaturas. Las líneas continuas muestran los valores predichos por la Ec. II.11

El área superficial de las muestras al final del secado varía entre el 75 y el 80 % del área original (fruta fresca), en tanto que en las mismas experiencias el espesor llega a ser aproximadamente el 30 % del espesor original.

En la Figura II.5 se presentan resultados experimentales del encogimiento en función del tiempo de secado, a las 45, 60 y 75 °C. La forma en que disminuye el espesor relativo es similar al mostrado por Hernandez et al. (2000) durante el secado de rodajas de mango de 0.5 cm de espesor.

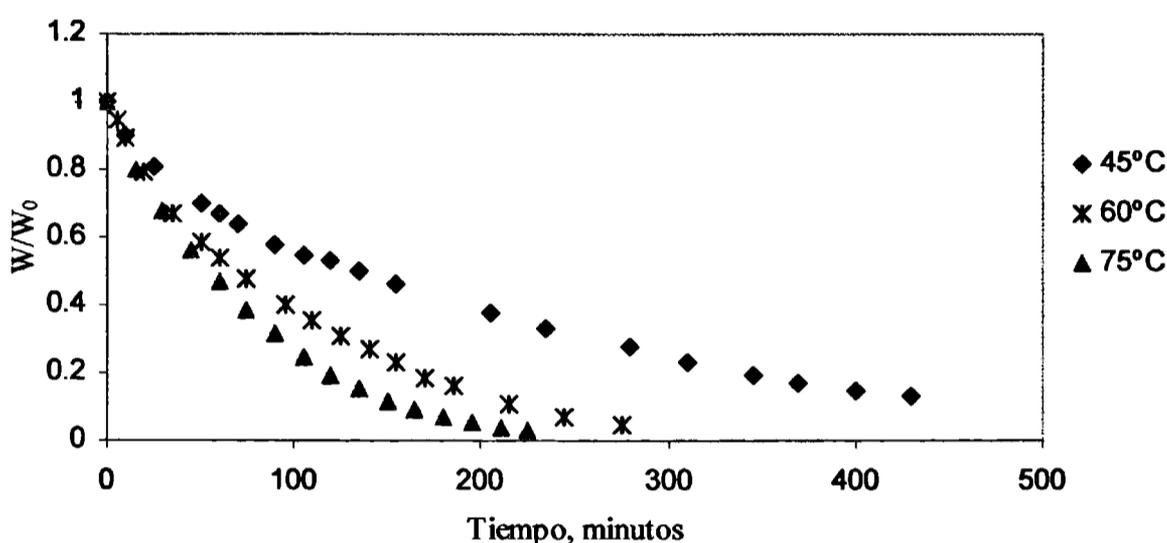


**Figura II 5.** Variación del espesor relativo durante el secado a diferentes temperaturas.

## 3.2 Cinética de secado

### 3.2.1 Velocidad de secado

En la Figura II.6 se muestra el contenido de agua adimensional a diferentes temperaturas de secado y velocidad de aire constante (1.5 m/s). Como era de esperar, el incremento en la temperatura de secado disminuye el tiempo requerido para lograr determinado valor de humedad en el sólido.



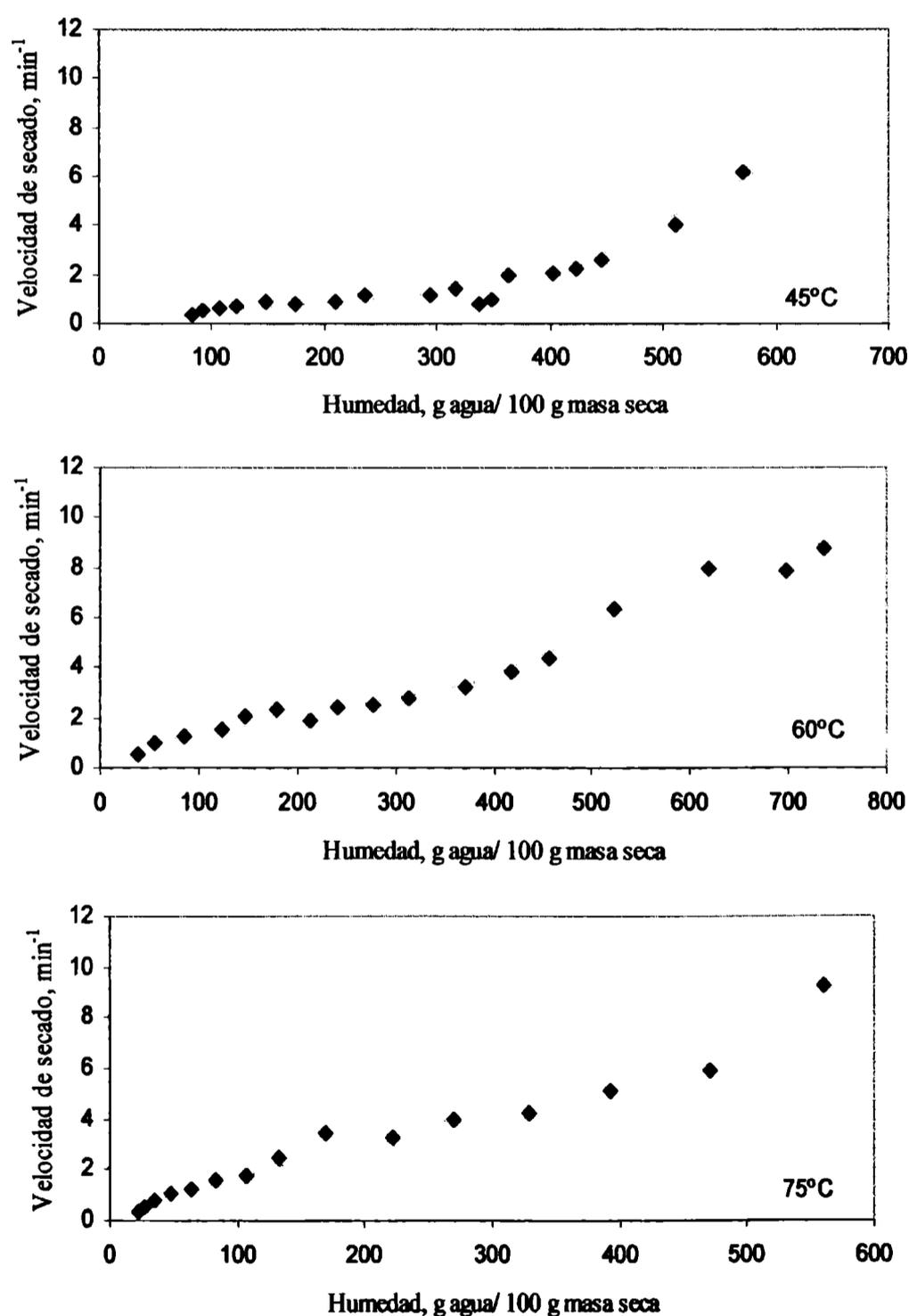
**Figura II.6.** Efecto de la temperatura sobre las curvas de secado de medias rodajas de ananá

Para analizar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de deshidratación se representaron los resultados experimentales de velocidad de secado (agua extraída en un intervalo de tiempo, calculada en base a 100 g de sólido seco) en función del contenido de agua de la fruta, Figura II.7. En las condiciones experimentales empleadas, estas curvas presentan las siguientes características: ausencia del período de velocidad constante, a pesar de los altos valores de humedad que exhibe la fruta de ananá, y dos períodos de velocidad decreciente (FRP.I y FRP.II). En todos los casos el primer período tiene una pendiente más pronunciada que el segundo período. La línea indica la tendencia de los puntos experimentales

Si bien el período de velocidad constante (CRP) puede presentarse durante el secado de frutas y hortalizas a muy baja velocidad del aire, raramente ha sido observado durante el secado de material biológico (Nogueira, 1991); el CRP se observó, aunque pero poco definido, durante el secado de láminas de puré de manzanas y de tomates a 60 °C (Semhan

et al, 2004) y no estuvo presente en el secado de bananas con flujo de aire de 3.3 m/s y temperaturas alrededor de 60 °C (Demirel & Turham, 2003).

A 45 °C pueden diferenciarse claramente los dos períodos de velocidad decreciente: el período de “secado superficial no saturado” o FRP.I, en el cual se supone existencia de un sistema mixto de control (interno-externo), se extiende hasta un valor de humedad en el producto de 400 %b.s. aproximadamente; a partir de este punto el movimiento del agua dentro del sólido es el mecanismo controlante del secado (estricto control interno) dando lugar al segundo período de período FRP.II.



**Figura II .7.** Curvas típicas de velocidad de secado de medias rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor, a diferentes temperaturas.

A 60 °C no se diferencia de modo tan contundente las dos etapas de velocidad decreciente, aunque existe un cambio en la pendiente de la curva generada por los puntos experimentales a un valor del contenido de agua 400 %b.s. aproximadamente.

A 75 °C se observa una pendiente importante entre los primeros puntos y luego disminuye la misma asumiendo un período de velocidad decreciente de estricto control interno.

La forma de las curvas es similar a las publicadas por Demirel & Turham (2003) en un trabajo de secado de bananas con aire caliente.

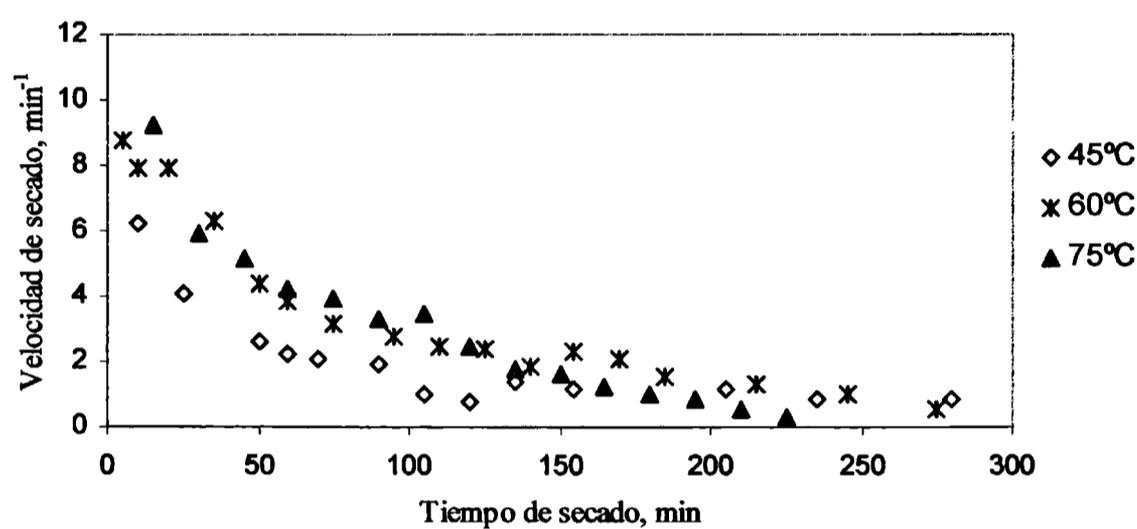


Figura II.8. Cambios en la velocidad de secado con el tiempo de proceso

Aún cuando una ecuación empírica que describa la velocidad de secado (DR) pueda ser considerada una sobre-simplificación del fenómeno de transferencia de masa, los parámetros resultantes pueden ser útiles para predecir el comportamiento del sistema. Los datos experimentales presentados en la Figura II.8 tienen un buen ajuste a una expresión empírica de la forma  $DR = \alpha \ln(t) + \beta$ , donde los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  cambian con la temperatura de secado. Los valores de estos parámetros y el ajuste estadístico se muestran en la Tabla II.3

Tabla II.3. Ajuste estadístico de los datos de velocidad de secado de ananá

Temperatura, °C	$\alpha$	$\beta$	$r^2$
45	- 1.340	8.153	0.880
60	- 2.228	13.234	0.958
75	- 3.105	17.189	0.983

En esta tabla puede observarse que los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son sistemáticamente dependiente de la temperatura. Sobre esta consideración, puede suponerse que los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  varían acorde a una relación lineal con la temperatura de secado. De esta manera y aplicando análisis de regresión, se obtuvieron las Ecuaciones II.26 y II. 27, donde T es la temperatura (°C).

$$\beta = 0.3012 T - 5.213 \quad r^2 = 0.995 \quad (II.26)$$

$$\alpha = - 0.05883 T + 1.3057 \quad r^2 = 1 \quad (II.27)$$

A partir de lo cual se obtuvo una ecuación generalizada para la predicción de la velocidad de secado de ananá en aire caliente:

$$DR = (- 0.058833 T + 1.3057) \ln(t) + 0.3012 T - 5.2133 \quad (II.28)$$

De estos resultados puede verse que el modelo lineal describe apropiadamente la dependencia de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  con la temperatura de secado, ya que los valores de  $R^2$  fueron iguales o mayores que 99.5 %. Asimismo, la velocidad de secado de ananá puede predecirse fácilmente a cualquier temperatura comprendida en el rango de 45-75 °C a partir de la Ecuación II.28.

### 3.2.2 Modelos de difusión de humedad

La Tabla II.4 muestra el resultado del ajuste de los dos modelos de difusión (con espesor constante y con espesor variable) a los datos experimentales de secado. Resultados del contenido de agua predichos y experimentales se muestran, a modo de ejemplo, en la Figura II.9, a las temperaturas correspondientes. Durante el ajuste de la ecuación analítica y de las ecuaciones numéricas a los datos experimentales se variaron los valores del  $D_{ef}$  hasta lograr el mínimo valor del  $E_{pp}$ , obteniéndose una aceptable concordancia entre los valores predichos y experimentales. Los valores del  $D_{ef}$  resultantes fueron inferiores al considerar el encogimiento que bajo la suposición de espesor constante. Esta diferencia se incrementa con la temperatura de secado, variando entre el 20 % a 45 °C y el 35 % a 75 °C. Estos resultados son concordantes con los publicados por Dissa et al. (2008) en un trabajo de secado convectivo de mango. Aún más significativas fueron las diferencias entre los valores del error promedio porcentual de la estimación ( $E_{pp}$ ). Esta mejor aproximación de los valores predichos con el modelo de difusión con espesor variable a los datos

experimentales está relacionada a la mejor representación del modelo matemático al fenómeno físico.

Se han publicado valores de difusividad de humedad durante el secado de rodajas de ananá considerando espesor constante: Nicoletti et al. (2001) obtuvieron valores del coeficiente de diffusion efectivo a diferentes temperaturas y velocidades del aire que variaron entre  $2.05 \times 10^{-10}$  a  $9.17 \times 10^{-10}$   $m^2/s$ ; Rahman & Lamb (1991) publicaron valores del Def durante el secado de ananá a 60 °C ( $9 \times 10^{-10}$  a  $12 \times 10^{-10}$   $m^2/s$ ). Estos valores están en concordancia con los presentados en la Tabla II.4, cuando se considera espesor constante.

**Tabla II.4.** Resultados del ajuste de los dos modelos de cinética de secado de ananá

Temperatura de secado (°C)	Espesor constante		Espesor variable	
	$D_{ef} \times 10^{10}$ ( $m^2/s$ )	Epp (%)	$D_{ef} \times 10^{10}$ ( $m^2/s$ )	Epp (%)
45	$2.667 \pm 0.254$	$5.07 \pm 1.87$	$2.117 \pm 0.142$	$6.55 \pm 1.82$
60	$4.722 \pm 0.256$	$11.07 \pm 3.62$	$3.183 \pm 0.161$	$4.47 \pm 1.04$
75	$7.920 \pm 0.838$	$14.51 \pm 6.69$	$5.038 \pm 0.172$	$1.95 \pm 1.13$

A partir de las formas de las curvas de cinética de secado (Figura II.9) se observa que al considerar el encogimiento en las ecuaciones del modelo difusional, los valores de humedad predichos están más próximos a los experimentales que aquellos valores predichos por el modelo con espesor constante, a las tres temperaturas analizadas. Este efecto es más importante en la última etapa de secado, cuando el efecto de la pérdida de espesor es importante.

El modelo desarrollado en diferencias finitas permite predecir la distribución de humedad dentro de la rodaja de ananá, con y sin encogimiento, durante el secado. Debido a las dificultades para medir experimentalmente la distribución del contenido de agua dentro de una placa plana de 0.6-0.4 cm de espesor, los perfiles de humedad predichos por el modelo numérico no pudieron ser verificados con datos experimentales. Solo el contenido medio de humedad fue cuantificado experimentalmente.

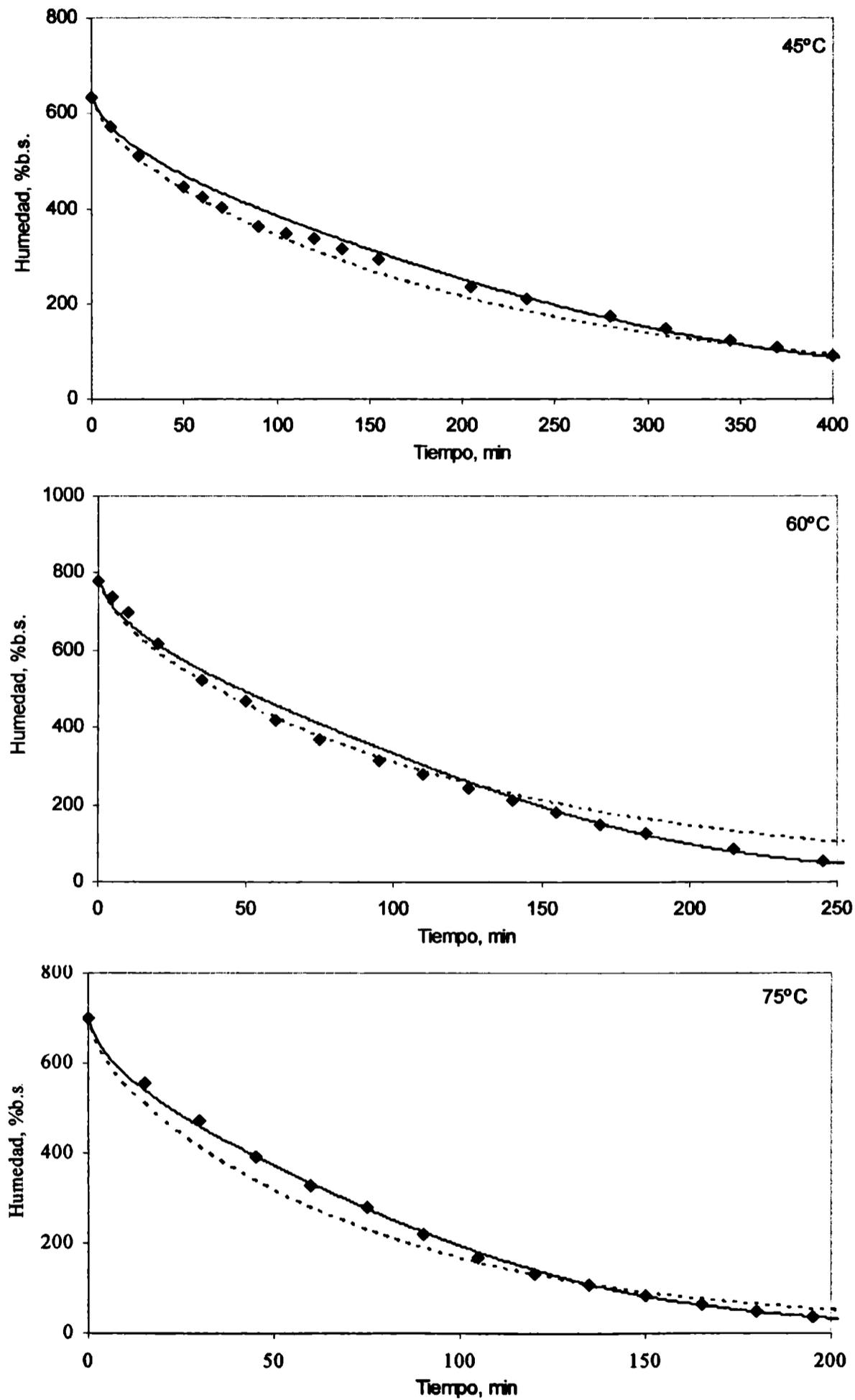
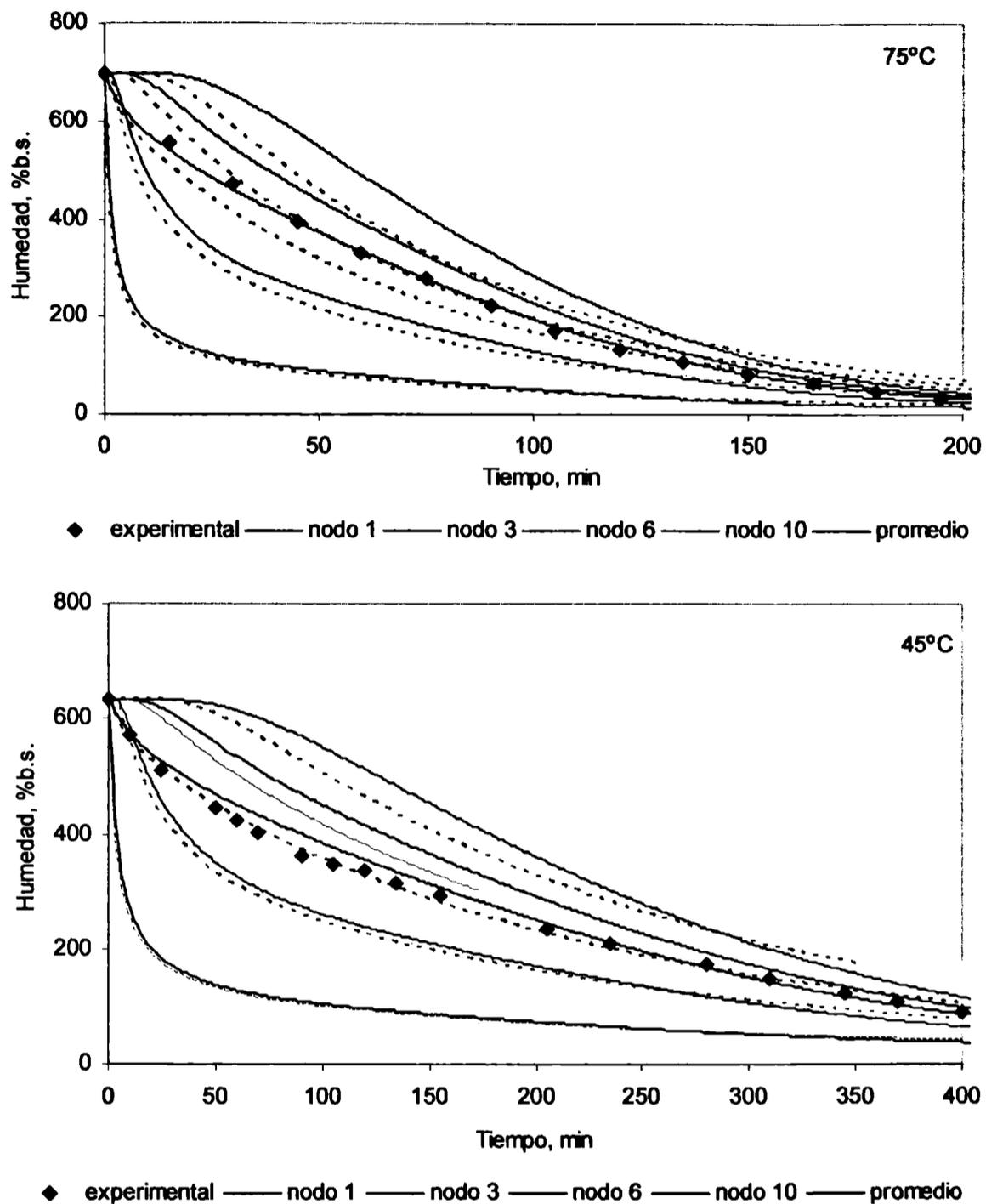


Figura II. 9. Valores del contenido de agua en ananá: experimentales (♦) y predichos por el modelo difusional de Fick con espesor constante (---) y con espesor variable (—).

La influencia del encogimiento sobre los valores predichos a través de la simulación numérica es más importante en las regiones más distantes de las superficies secas del cuerpo, como se muestra en la Figura II.10. Aquí, las líneas punteadas representan los valores de humedad simulados a partir del método de las diferencias finitas con espesor constante y las líneas continuas los valores predichos con espesor variable. Puede notarse que el contenido de agua en la superficie del sólido decrece rápidamente y que no se observan diferencias entre los valores estimados con los dos modelos matemáticos. Esto es predecible ya que ambos modelos aplican, para su integración numérica, la condición de contorno que establece que la humedad en la superficie es igual a la humedad de equilibrio a esa temperatura. Por lo cual en las proximidades a la superficie del sólido las diferencias de resultados estimados por ambas técnicas deberían ser prácticamente nulas.

El efecto de incluir la contracción en el modelo es más drástico para el secado a altas temperaturas que a bajas, lo cual es predecible debido a que, para los tiempos de procesamiento que se exhiben, el efecto del encogimiento es más importante a altas temperaturas debido a una mayor pérdida de agua. A modo ilustrativo se presentan los perfiles de humedad a 45 y 75 °C simulados con espesor constante y variable (Figura II.10).

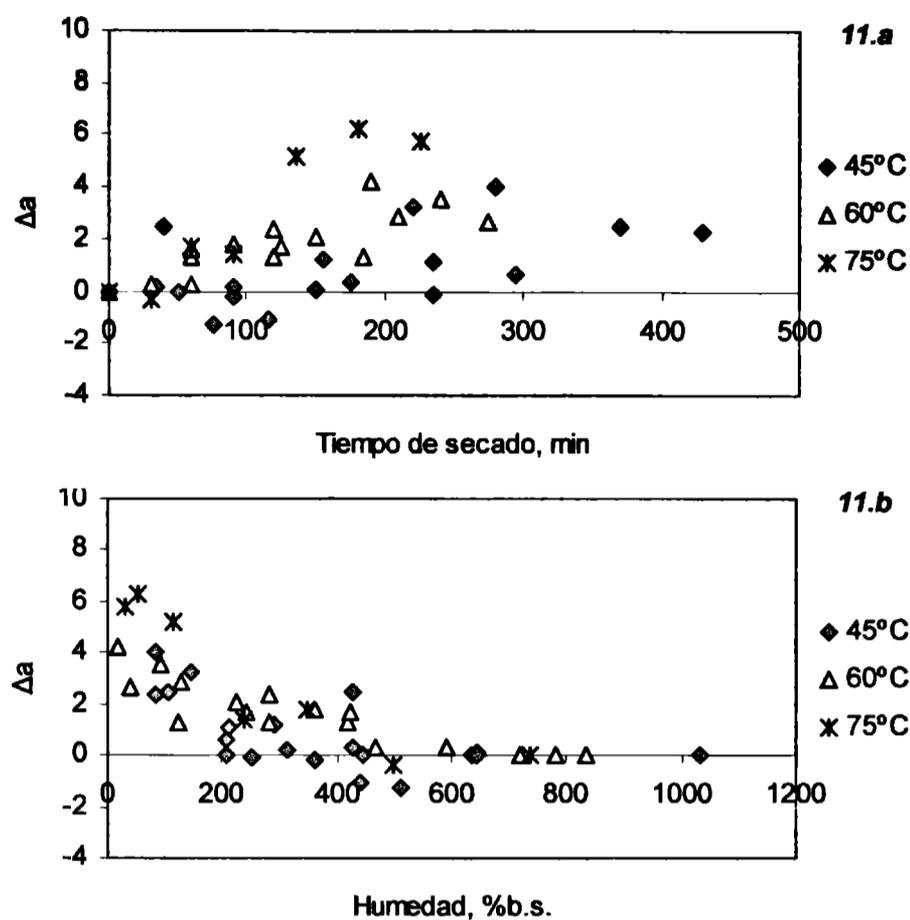


**Figura II. 10.** Cambios en el contenido de agua durante el secado, en distintas posiciones dentro de la rodaja de ananá. (♦) promedio experimental; (—) simulados con espesor variables; (---) simulados con espesor constante.

### 3.3 Variación del color

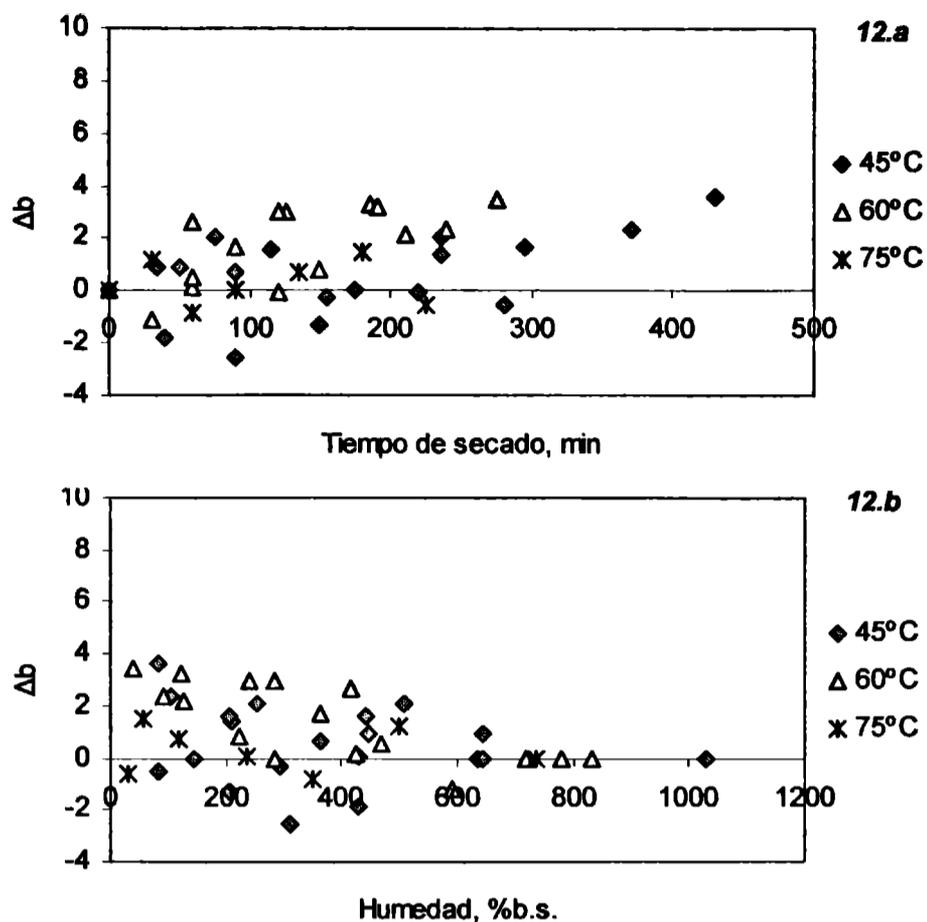
#### 3.3.1 Cambios en las medidas de los atributos del color a y b

Los valores de  $a$  y  $b$  aumentan durante el secado a 45 y 60 °C. A 75 °C solo se aprecia aumento en el parámetro  $a$  (de -14 a -7), lo cual indicaría que nos alejamos de la región con pigmentación verdosa sin incrementos en el amarillo.



**Figura II.11.** Cambios en los valores del parámetro del color  $\Delta a$  durante el secado de ananá a diferentes temperaturas, en función del tiempo de proceso (II.11.a) y del contenido de agua de la fruta (II.11.b).

Los valores del color  $a$  aumentan durante el secado, con una cinética que depende de la temperatura del proceso cuando los datos se analizan en función del tiempo de secado (Figura II.11.a). Debido a que el contenido de agua a cada tiempo es función de la humedad inicial y de la temperatura del proceso, se analizaron los valores de  $\Delta a$  en función del contenido de agua de la muestra y se demostró que existe un notable incremento de los mismos a medida que disminuye el agua contenida en la fruta y que este comportamiento es independiente de la temperatura del proceso de secado. Solo se aprecian diferencias significativas en la última etapa del secado a 75 °C respecto de los resultados obtenidos a las otras temperaturas, para el mismo contenido de agua. Eso podría indicar que a bajas humedades, cuando la temperatura del sólido aumenta lo suficiente, podrían producirse reacciones no enzimáticas con desarrollo de coloración oscura.



**Figura II.12.** Cambios en los valores del color  $\Delta b$  durante el secado de ananá a diferentes temperaturas, en función del tiempo de proceso (II.12.a) y del contenido de agua de la fruta (II.12.b)

Los valores del color  $b$  aumentan ligeramente durante el secado a 45 y 60 °C, y permanecen prácticamente sin cambios durante el secado a 75 °C (Figura II.12.a). Cuando los resultados se evalúan en función de la humedad (Figura II.12.b), las observaciones son las mismas: aumenta el  $\Delta b$  a medida que avanza la deshidratación, siendo más notorios los cambios generados a 45 y 60 °C.

Los valores del color  $a$  cambian de manera mas sistemática y significativa que los valores del color  $b$ , durante el secado de ananá a diferentes temperaturas.

### 3.2.2 Cambios en la medida del color L

Las variaciones de valores de  $L$  no fueron significativas. Los valores medidos de la diferencias de color  $\Delta L$  en rodajas de ananá durante el secado a diferentes temperaturas son presentados en la Figura II.13. Es evidente que el valor de  $L$  no se ve afectado por la temperatura del proceso. Se observa, además, en dicha figura una importante dispersión de los valores medidos. Observaciones similares sobre los valores de  $L$  (notable dispersión de

los valores medidos; ausencia de tendencia a algún cambio, positivo o negativo, durante el proceso; independencia con la temperatura de secado) fueron reportados por Krokida, Tsami and Maroulis (1998) durante el secado de manzanas, bananas, zanahorias y papas y por Tsami & Katsioti (2000) durante el secado de frutillas.

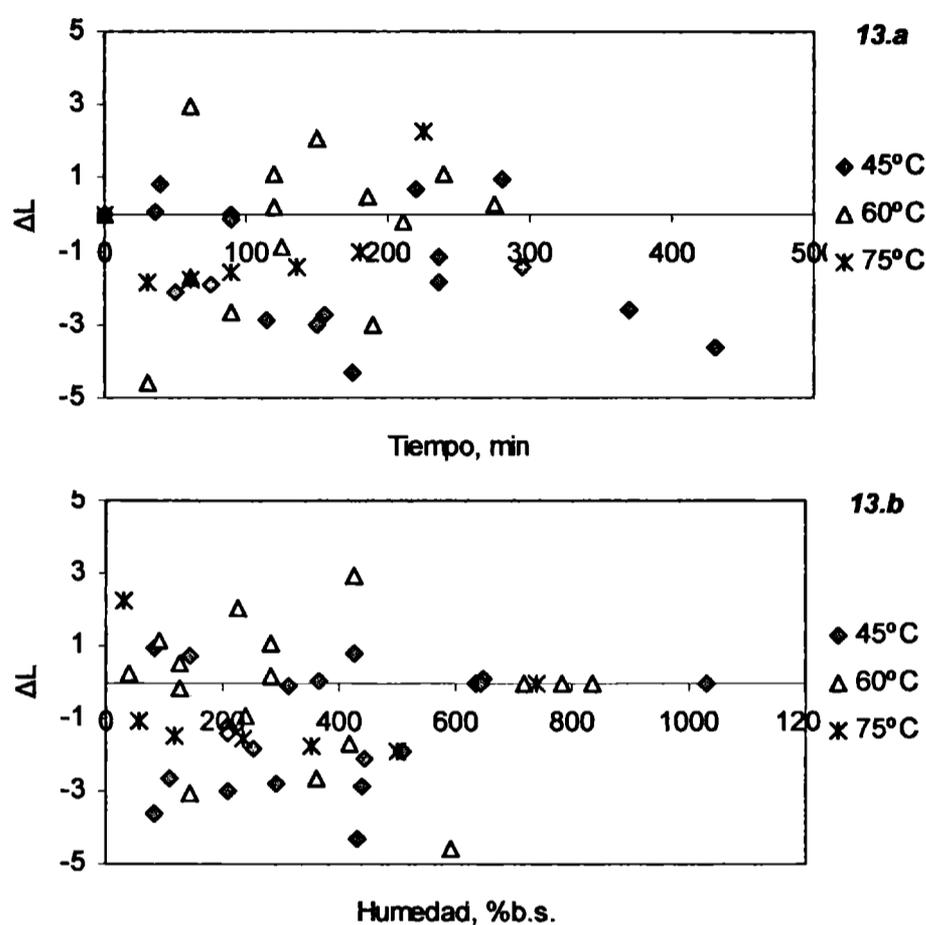


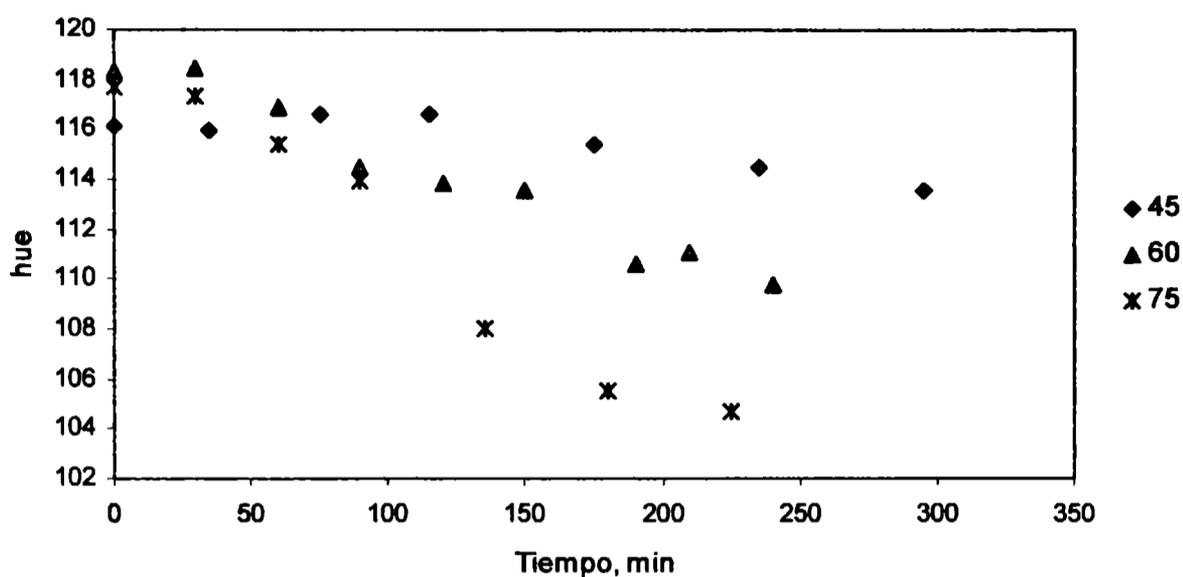
Figura II.13. Cambios en los valores del color  $\Delta L$  durante el secado de ananá.

### 3.2.3 Hue y Chroma

*Hue* es ampliamente utilizado como herramienta analítica para describir el color, ya que representa lo que una persona piensa cuando se refiere a un color específico. Un valor del ángulo *hue* de  $90^\circ$  representa el típico color amarillo.

En todas las mediciones la fruta fresca presentó un valor de *hue* mayor a  $100^\circ$ ; en la medida que avanza la deshidratación este valor disminuye (aumento de coloración amarilla), aunque en ningún caso se registraron valores menores a  $90^\circ$ .

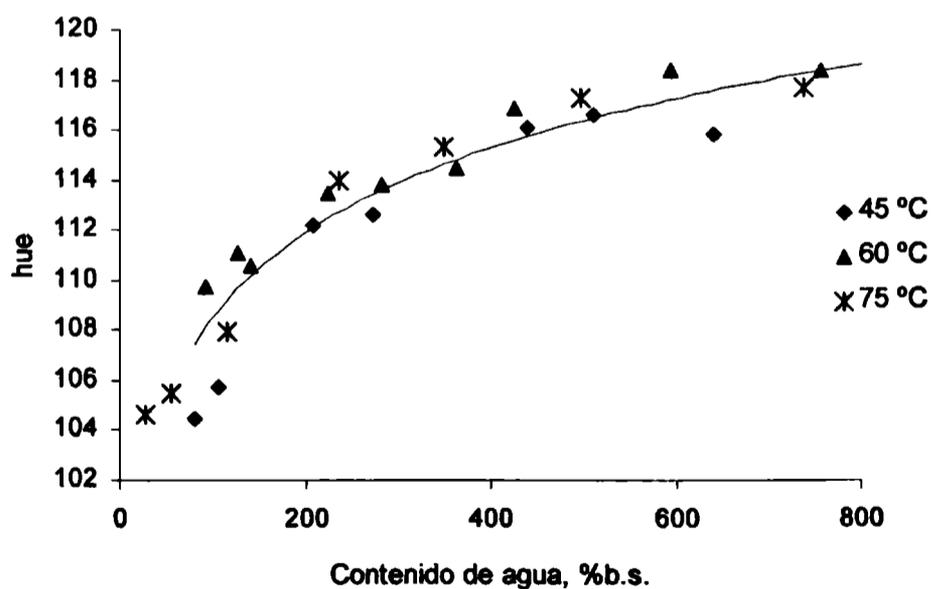
El *hue* fue el parámetro de color que presentó cambios más significativos y consistentes durante el proceso. Se encontró que la variación del *hue* con el tiempo de secado presenta comportamiento lineal y que la velocidad de cambio aumenta con la temperatura del proceso (Figura II.14).



**Figura II.14.** Cambio en los valores de *hue* de medias rodajas de ananá, durante el secado a distintas temperaturas.

El análisis estadístico de los resultados indica que el parámetro *hue* tiene un comportamiento semilogarítmico con la humedad y el modelo empírico resultante, Ecuación II.29, es independiente de la temperatura de secado. La curva predicha por esta ecuación es mostrada en la Figura II.15 como una línea continua. El coeficiente de correlación entre los valores experimentales y los predichos ( $r^2$ ) es 0.906 .

$$hue = 4.8843 \ln(W) + 86.03 \quad (II.29)$$



**Figura II.15.** Variación en los valores de *hue* en función al contenido de agua de ananá durante el secado a 45, 60 y 75 °C. La línea continua representa los valores calculados con la Ec. II.29.

En la Figura II.15 se puede apreciar que el parámetro *hue* disminuye en la medida que avanza la deshidratación y en forma independiente a la temperatura de secado. Por estas observaciones experimentales, los cambios en el color pueden ser atribuidos a la simple concentración de los pigmentos durante el secado.

El *chroma* presenta un ligero aumento durante el secado a 45 y 60 °C; los resultados registrados a 75 °C muestran muy poca (o ausente) variación en este parámetro, tal como se muestra en la Figura II.16.

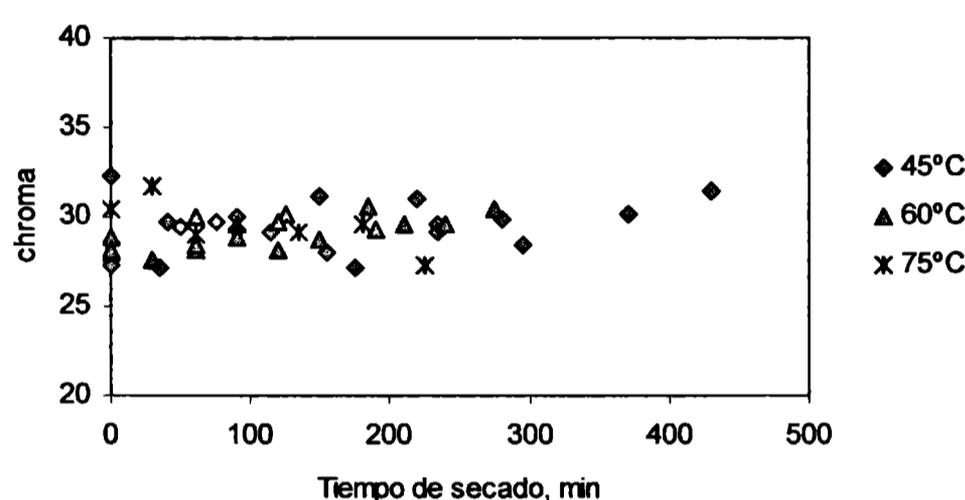


Figura II.16. Variación en los valores del *chroma* en ananá durante el secado a 45, 60 y 75 °C.

### 3.3 Contenido de ácido L-ascórbico

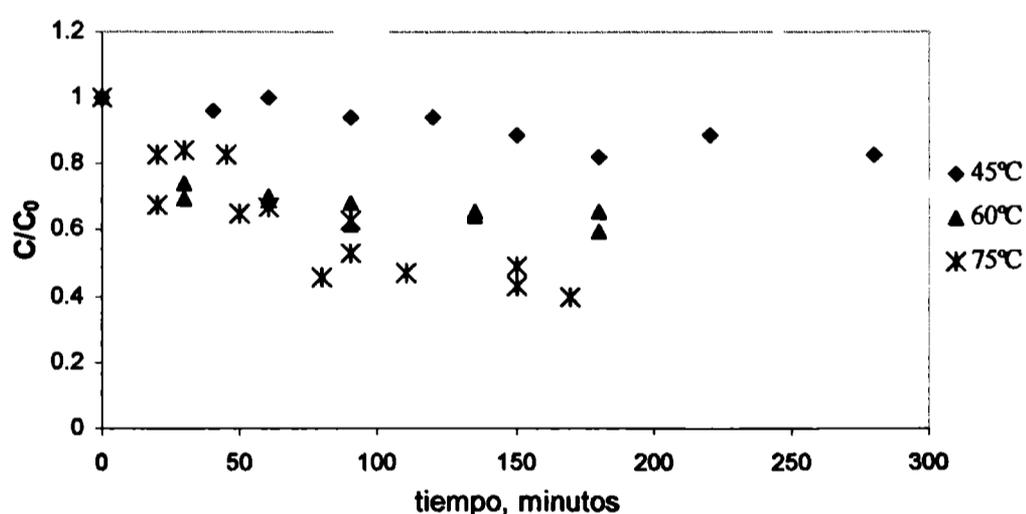
#### 3.3.1 Resultados experimentales

El contenido de vitamina C durante el secado se evaluó en mg de nutriente por gramo de masa seca, ya que este valor (masa seca) no cambia durante el proceso. La máxima retención de AA se obtuvo durante el secado a 45 °C (Figura II.17). Se observó que las diferencias en los valores del contenido de AA en la fruta fresca ( $C_0$ ) no afectan la cinética de deterioro, ya que el comportamiento global de las experiencias en tres repeticiones fue similar. A 75 °C la dispersión de los resultados es importante; la alta variabilidad no pudo atribuirse a diferencias en los valores de  $C_0$  ni al pH de las frutas. Similar situación de variabilidad se observó en vegetales verdes (Giannakourou & Taoukis, 2003) y durante el secado de caquis o persimmons (Nicoletti et al., 2004), entre otros.

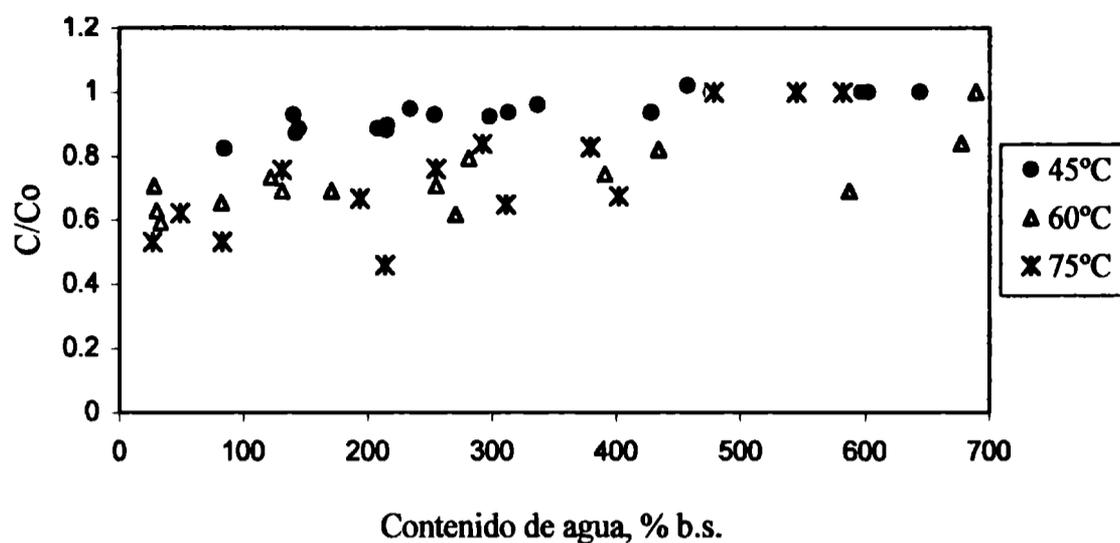
**Tabla II.5.** Retención de ácido ascórbico en medias rodajas de ananá, cuando el contenido de humedad alcanza el 50 % y el 30 % del valor inicial

Temperatura de secado (°C)	50 % de la humedad inicial		30 % de la humedad inicial	
	Tiempo (min.) $\pm$ ds	% de retención de AA $\pm$ ds	Tiempo (min.) $\pm$ ds	% de retención de AA $\pm$ ds
45	115.0 $\pm$ 18.02	93.9 $\pm$ 1.01	231.7 $\pm$ 27.54	88.7 $\pm$ 0.58
60	71.0 $\pm$ 3.60	79.7 $\pm$ 5.13	133.3 $\pm$ 7.64	71.3 $\pm$ 8.08
75	45.0 $\pm$ 5.00	73.3 $\pm$ 11.37	80.0 $\pm$ 10.00	63.0 $\pm$ 19.67

Un incremento en la temperatura de secado favorece la velocidad del proceso, pero simultáneamente se incrementa la velocidad de degradación del AA. El tiempo requerido para que el contenido de humedad descienda al 50 % y al 30 % del valor inicial y la respectiva retención de ácido ascórbico, a cada temperatura, se muestran en la Tabla II.5. Cada valor es el resultado de la media de tres ensayos y se presentan junto al desvío estándar consecuente. Se observa que el tiempo necesario para alcanzar determinado valor de  $W/W_0$  es menor a 75 °C que a 45 °C, sin embargo la retención de ácido ascórbico es mayor a 45 °C.

**Figura II. 17.** Contenido de ácido l-ascórbico (relativo a su valor inicial) durante el proceso de secado a 45, 60 y 75 °C.

En la Figura II.18 se muestra la retención de ácido ascórbico en ananá durante el secado a tres temperaturas diferentes, en función al contenido de agua de la fruta. Para un dado valor de humedad, la retención del AA es similar a 60 y 75 °C, pero se observa claramente una mayor retención durante el secado a 45 °C.



**Figura II.18.** Contenido de ácido ascórbico en ananá durante el proceso de secado a diferentes temperaturas, en función a su contenido de agua.

### 3.3.2 Predicción del contenido de ácido ascórbico durante el secado

Se estimó el contenido de AA en rodajas de ananá durante el secado a 45 °C a través del esquema de cálculo expuesto en la Figura II.3, que involucra isotermas de sorción de agua (Ecuación II.17) y un modelo de cinética de degradación de AA en ananá (Ecuaciones II.13 y II.18), disponibles en literatura específica (Pardio Sedas et al., 1994; Hossain et al., 2001).

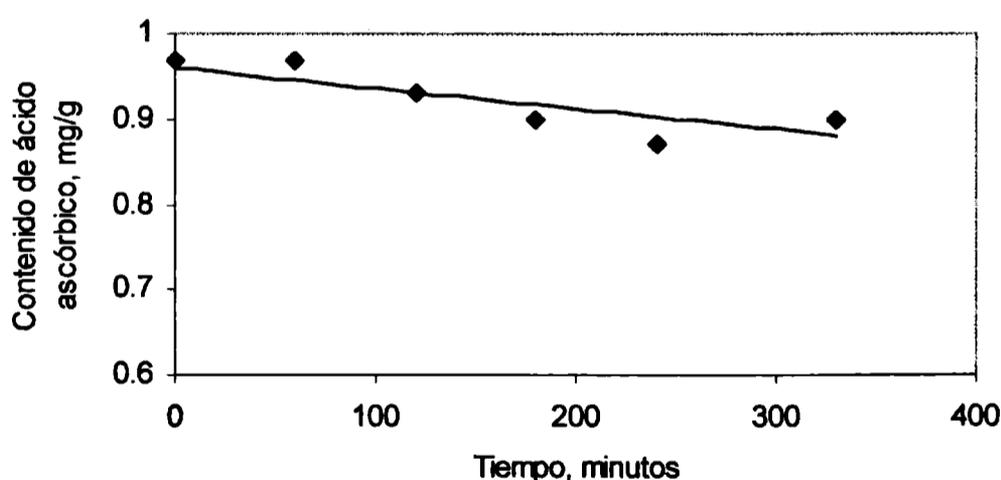
De acuerdo al **Planteo I**, dado el valor experimental del contenido de agua promedio en la muestra de fruta fresca ( $t=0$ ), se calcula el  $a_w$  correspondiente haciendo uso de la Ecuación II.17 (isotermas de sorción de agua). Este valor de  $a_w$  determina la constante cinética de la Ecuación II.13, en la forma de la Ecuación II.18. La solución numérica de la Ecuación II.13 permite estimar los valores de contenido de ácido ascórbico en el ananá conociendo la concentración inicial del nutriente (fruta fresca) y la humedad promedio de la fruta durante el secado, este último dato se obtuvo con la Ecuación II.2 a cada tiempo. El procedimiento de cálculo se repite hasta alcanzar el tiempo final del ensayo. La capacidad predictiva del modelo se analizó comparando los resultados predichos con los valores experimentales del contenido medio de AA a diferentes tiempos de secado a través del error promedio porcentual (Epp).

El modelo matemático que describe las isotermas de sorsión de agua en ananá propuesto por Hossain et al. (2001), fue desarrollado para muestras de ananá con humedades intermedias y es válido cuando la humedad de la muestra es inferior al 50 %b.s. ( $a_w = 0.97$ ,

$W_e = 50 \%$ ). En la fruta fresca la humedad alcanza valores por encima de 600 %b.s. y se logró el 50 %b.s. después de 300 minutos de secado a 45 °C. Para salvar esta situación y aplicar el modelo en todo el rango de humedad experimental fue necesario suponer  $a_w = 1$  cuando la humedad en el producto fuera superior que 50 %b.s.

Si bien los resultados obtenidos con este modelo presentan un excelente ajuste a los resultados experimentales, no considera el perfil de humedad que se genera en el interior del sólido durante el proceso. Por ello se plantea un segundo modelo de cálculo, **Planteo II**, que utiliza las diferencias divididas finitas para simular el perfil de humedad en el interior del alimento (Ecuaciones II.7 a II.10) y sobre dicho perfil se aplica el esquema de cálculo de degradación de AA.

No se encontró diferencias en los resultados obtenidos a través de los dos planteos. Esta similitud de resultados se atribuyó a que el modelo cinético utilizado en este estudio fue desarrollado para ananá con humedad menor al 50 % y a 45 °C aún el nodo externo mantiene valores de humedad superiores a este límite durante prácticamente todo el proceso de secado. En esta situación la concentración de ácido ascórbico promedio de los diez nodos (Planteo II) es igual a la concentración de AA estimada con la humedad promedio del sólido a cada tiempo (Planteo I).



**Figura II. 19.** Contenido de ácido ascórbico (mg/g de producto seco) en rodajas de ananá durante el proceso de secado a 45 °C (♦ experimental; — calculado según Planteo II).

La concordancia entre los datos experimentales y los valores predichos para el contenido de AA durante el secado de rodajas de ananá a 45 °C, se muestra en la Figura II.19. El error relativo porcentual medio de la estimación, en tres ensayos realizados a esta temperatura,

fue de 3.99 %. Este valor muestra que el modelo de predicción en sistemas de humedad variable, como es el secado de frutas, a partir de un modelo de degradación de ácido ascórbico en condiciones estacionarias (humedad y temperatura constantes), puede ser aplicable para predecir las condiciones de secado con óptima retención del nutriente.

### 3.4 Propiedades mecánicas

La variación de las propiedades mecánicas durante el proceso de secado a 45, 60 y 75 °C es presentada en la Tabla II.6. Se puede observar un aumento regular en los valores de tensión a la fractura ( $\sigma_{Hf}$ ) con el tiempo de secado, en todos los casos. Esto estaría indicando un incremento en la firmeza de los trozos de fruta. Durante el secado a baja temperatura (45 °C) se registró un incremento más marcado en los valores de este parámetro debido, posiblemente, a que con bajas velocidades de secado se obtiene productos de composición y densidad más uniformes. Dobias et al. (2006), en un estudio de evaluación del efecto del calentamiento en frutas y otros vegetales enlatados, encontraron que a 70 °C los cambios de textura de las manzanas fueron más importantes que a 90 y 100 °C.

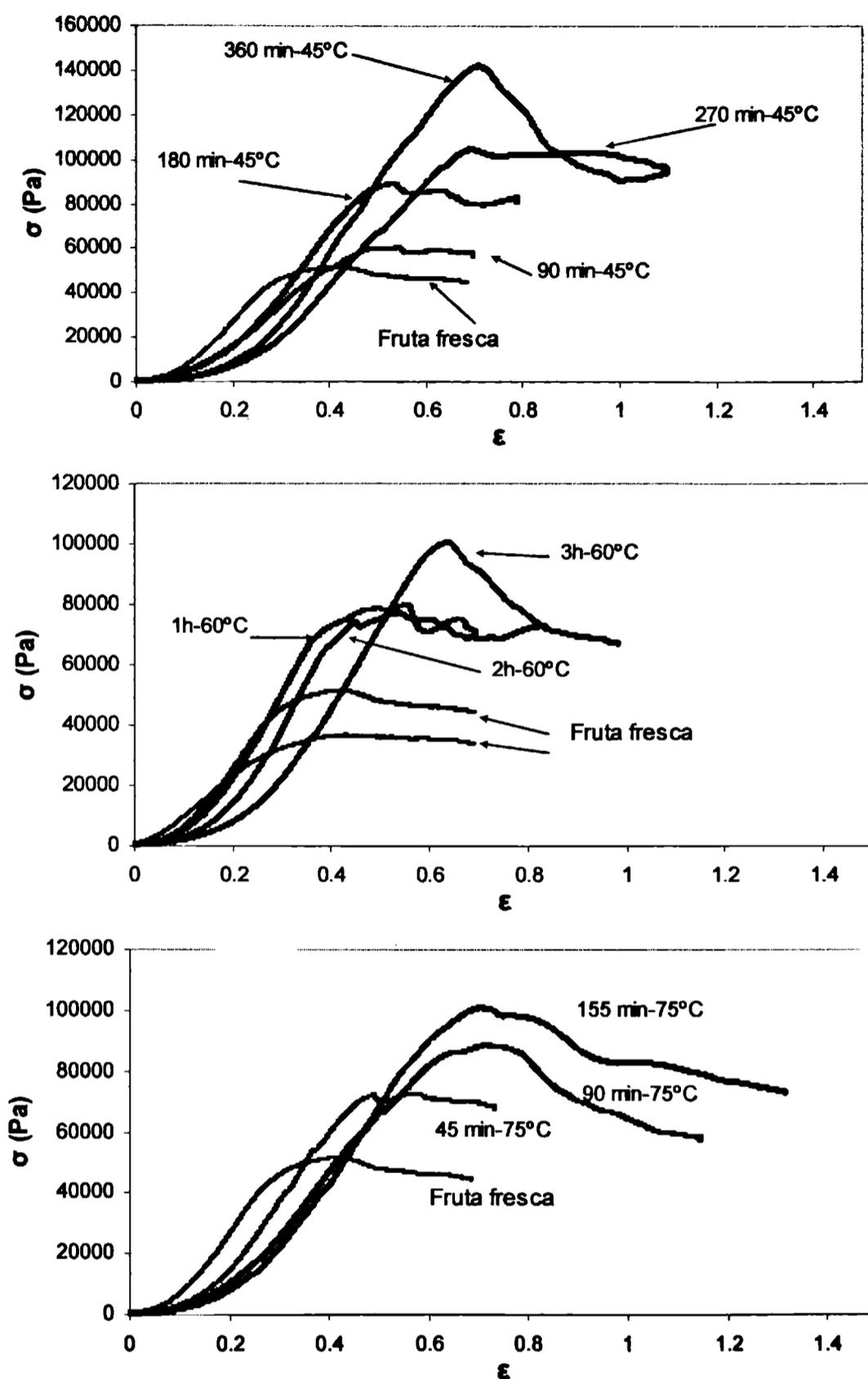
**Tabla II.6.** Valores medios y desvío estándar de tensión ( $\sigma_{Hf}$ ) y deformación ( $\varepsilon_{Hf}$ ) de falla y modulo de compresión ( $E$ ) de rodajas de ananá, durante el secado con aire a 45, 60 y 75 °C.

Tiempo de secado (min)	$\sigma_{Hf} \pm sd$ (kPa)	$\varepsilon_{Hf} \pm sd$ (%)	$E \pm sd$ (kPa)
Secado en aire a 45 °C			
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31
90	56.46±6.77	0.37±0.051	25.55±3.30
180	90.26±9.11	0.59±0.053	19.66±6.33
270	111.99±14.51	0.56±0.098	14.78±5.83
360	139.46±20.94	0.69±0.05	11.99±4.78
Secado en aire a 60 °C			
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31
60	74.94±9.48	0.45±0.024	23.41±5.96
120	77.79±9.98	0.56±0.078	21.25±6.17
180	98.63±8.88	0.62±0.075	13.51±3.55
Secado en aire a 75 °C			
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31
45	76.07±10.33	0.45±0.065	28.36±9.89
90	91.85±16.99	0.48±0.054	25.42±9.90
155	98.67±11.48	0.76±0.092	13.21±4.15

A mayor temperatura de secado (60 y 75 °C) y en tiempos intermedios del proceso, este parámetro indicador de la firmeza de la fruta ( $\sigma_{Hf}$ ) muestra una disminución menos drástica que en los primeros tiempos de secado. Esto podría deberse al efecto combinado de un “ablandamiento” de la fruta por efecto de exposición al aire caliente y “endurecimiento” debido a la deshidratación. Este “endurecimiento” se incrementa con el tiempo de secado, reflejándose en el incremento de los valores de  $\sigma_{Hf}$ . Comportamiento similar fue observado por Troncoso & Pedreschi (2007) durante el secado de rodajas de papas a 50 °C. La Figura II.20 muestra las curvas típicas de ensayos de compresión (tensión vs deformación) de ananá secado a 45, 60 y 75 °C por diferentes tiempos. En estos gráficos se puede observar que las curvas de muestras de ananá con menor humedad exhiben con mayor claridad la forma de “campana”, con un máximo correspondiente al valor de  $\sigma_{Hf}$ .

El módulo de compresión (E), si bien exhibe alta dispersión de los resultados que se traduce en los valores del desvío estándar, es el parámetro que sufre los cambios más drásticos al inicio del proceso, ya que su valor luego aproximadamente una hora de secado está en el orden del 35 % del valor inicial y estaría indicando una marcada disminución de la resistencia elástica del sistema. Al final del secado, este parámetro disminuyó al 18 % del valor inicial. Este efecto, disminución en la pendiente inicial de la curva tensión-deformación por efecto de la temperatura, ha sido observado en la deshidratación osmótica de mango y frutilla (Chiralt et al., 2001), en el calentamiento de zanahorias y manzanas enlatadas (Dobias et al., 2006), entre otros.

La deformación a la fractura ( $\epsilon_{Hf}$ ) aumenta durante todo el proceso de secado y es independiente de la temperatura del proceso, en el rango del presente estudio.



**Figura II 20.** Curvas de ensayos de compresión (tensión vs deformación) de muestras de ananá secadas a 45, 60 y 75 °C por diferentes tiempos

### 3.5 Rehidratación

La rehidratación implica un retroceso respecto de algunos de los cambios fisicoquímicos que ocurren en la fruta durante el secado. En general, el índice de la absorción del agua y el

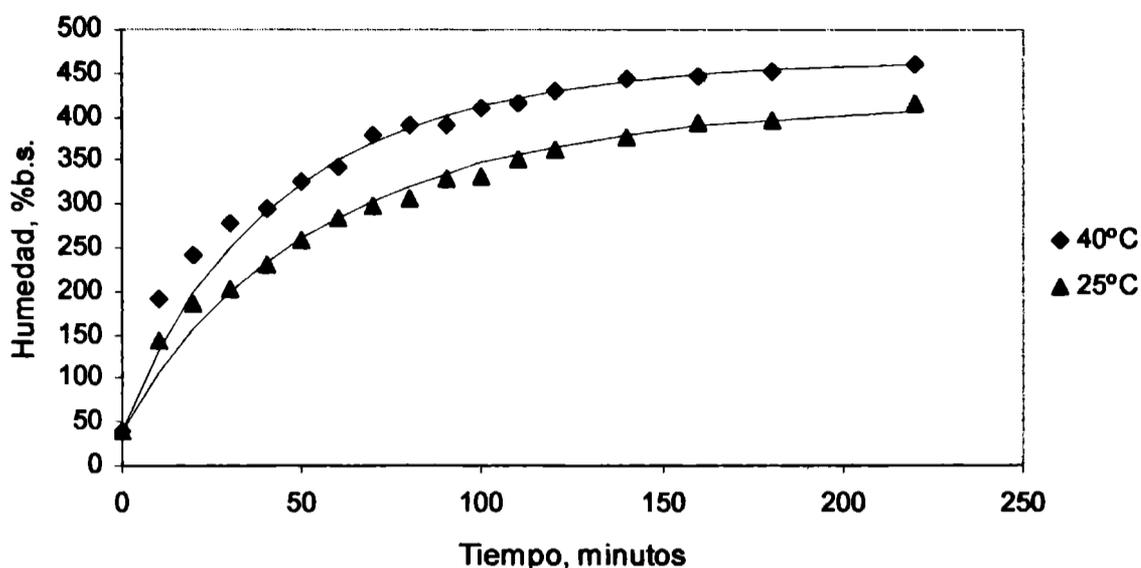
---

grado de la restitución del producto seco son influenciados por el grado de sequedad alcanzado, es decir, por el grado de afectación de la integridad celular. Se puede suponer que el movimiento de humedad durante el proceso de rehidratación ocurre por difusión líquida, con transferencia de agua desde el líquido de rehidratación al sólido seco hasta que se alcanza el equilibrio.

Los resultados experimentales del contenido de agua en la fruta fresca presentaron una amplia variabilidad, comprendidos entre el 600 %b.s. y más del 900 %b.s. En las condiciones experimentales de rehidratación del presente estudio, la fruta llega a alcanzar en dos horas un valor máximo del contenido de agua de 450 %b.s. La velocidad de absorción de agua al inicio del proceso es importante, esta velocidad disminuye aproximadamente tres veces entre 0.5 y 2 horas de rehidratación.

Por otra parte, con muestras de ananá presecado a 75 °C se realizó un ensayo, con cuatro repeticiones, de rehidratación durante 10 h. Durante la primera hora del proceso se absorbió el 60% del agua total ganada en 10 h de rehidratación. La humedad en la fruta alcanzó el 52% del valor de humedad en la fruta fresca utilizada en este ensayo. Debido a que la humedad de saturación es muy inferior a la humedad de la fruta fresca podemos inferir que los cambios estructurales que ocurren en el tejido vegetal durante el secado son irreversibles. Este efecto fue observado por Krokida & Philippopoulos (2005) durante la rehidratación de numerosas frutas y hortalizas presecados.

Conociendo la variación de humedad (Ec. II.22) en función del tiempo, se pudieron determinar los valores de K y N, a dos temperaturas de rehidratación. Datos experimentales de  $\ln(MR)$  y el tiempo fueron procesados mediante análisis de regresión minimizando el error estándar de la desviación para determinar los parámetros K y N. Los valores de  $r^2$  fueron, en todos los casos, mayores a 0.91, mostrando que el modelo de Page describe adecuadamente la ganancia de agua en ananá en función del tiempo de rehidratación.



**Figura II.21.** Contenido de agua experimental (símbolos) y predicho por el modelo de Page (línea continua) durante la rehidratación a 25 y 40 °C de medias rodajas de ananá secadas a 60 °C.

Valores experimentales y predichos por el modelo de Page del contenido de agua de medias rodajas de ananá pre-secadas a 60 °C durante el proceso de rehidratación a 40 y 25 °C se muestran en la Figura II.21. Los valores predichos estuvieron próximos a los experimentales, como se manifiesta en los valores del error relativo promedio porcentual (Epp) de la estimación, calificados entre 2.65 % y 4.13 %, como se muestra en la Tabla II.7. El parámetro N permanece constante, siendo independiente del proceso de secado previo.

El parámetro K puede ser considerado como una medida de la velocidad de ganancia de agua cuando se comparan experiencias cuyos valores de N sean similares, puesto que N determina la escala del eje de abscisas ( $t^N$ ). De esta manera se observó que K aumenta con la temperatura de rehidratación y disminuye con el aumento de la temperatura del pre-tratamiento de secado, indicando una mayor velocidad de rehidratación en las muestras de ananá pre-secado a 45 °C que en el ananá secado a 75 °C.

Esto podría explicarse en base a que en el presente trabajo las condiciones iniciales de rehidratación no fueron iguales: los valores de humedad estuvieron comprendidos en el rango 25-80 %b.s.; esto es, la humedad al final del secado a 75 °C fue inferior a la humedad de la fruta al final del secado a 45°C. Por otro lado, la mayor temperatura de secado puede originar una estructura superficial, muy delgada, más compacta (*costra*), lo cual podría conducir al colapso de los caminos para la entrada del agua y, en consecuencia, a una menor velocidad de rehidratación.

**Tabla II.7.** Parámetros de la ecuación de Page y Epp de las estimaciones.

Temperatura de secado	Rehidratación a 25 °C			Rehidratación a 40 °C		
	K	N	Epp	K	N	Epp
45 °C	0.0286±0.0041	0.93	2.65	0.0374±0.0042	0.93	2.95
60 °C	0.0237±0.0021	0.93	4.08	0.0276±0.0039	0.93	3.67
75 °C	0.0173±0.0009	0.93	4.13	0.0206±0.0033	0.93	3.11

La capacidad de absorción de agua se puede cuantificar en base a los parámetros RR y COR (Ecuaciones II.19 y II.20). Los valores del COR y del RR para las muestras de ananá con dos horas de rehidratación se detallan en la Tabla II.8. Estos coeficientes, expresados en cada caso como la media de los resultados de tres ensayos, no presentan diferencias significativas a las dos temperaturas de rehidratación aplicadas.

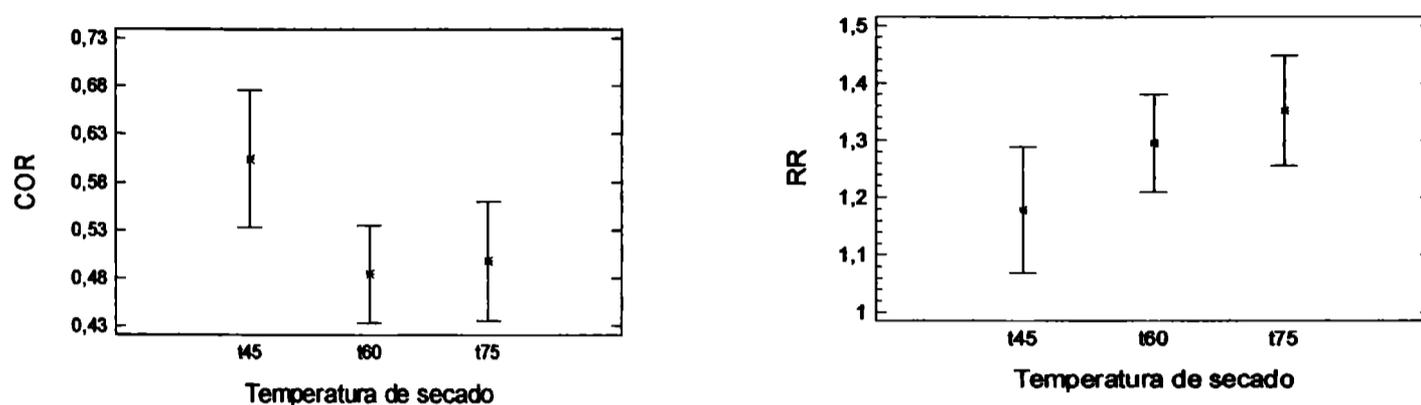
La relación de rehidratación (RR) aumenta con el tiempo de rehidratación, es independiente de la temperatura del proceso de rehidratación y de la temperatura del pre-tratamiento de secado, aún cuando los valores medios indican tendencia. Sin embargo, el análisis estadístico (ANOVA) muestra que no existen diferencias significativas entre los valores del parámetro RR a las tres temperaturas de secado ensayadas, debido a la dispersión de los resultados, como se ilustra en la Figura II.22. Los valores que se representan en esta figura corresponden a los ensayos de rehidratación a 40 °C.

**Tabla II.8.** Características de rehidratación (2 h) de ananá secado con aire caliente.

Temperatura de secado	Rehidratación a 25 °C		Rehidratación a 40 °C	
	COR	RR	COR	RR
45 °C	0.515 ± 0.078	1.188 ± 0.037	0.604 ± 0.112	1.178 ± 0.084
60 °C	0.493 ± 0.152	1.262 ± 0.107	0.544 ± 0.095	1.295 ± 0.107
75 °C	0.492 ± 0.064	1.354 ± 0.138	0.498 ± 0.011	1.351 ± 0.151

Resultados similares se obtuvieron del análisis estadístico de los valores del parámetro COR de los ensayos individuales de rehidratación, indicando que no existen diferencias significativas entre los mismos. Esto señala que el COR es independiente de la temperatura del proceso de rehidratación y de la temperatura del pre-tratamiento de secado. A pesar de

ello, los valores medios de este coeficiente estarían indicando una mayor habilidad de hidratación en las muestras de ananá pre-tratadas a 45 °C. Este resultado es concordante con valores del coeficiente K derivado de la aplicación del modelo de Page (Tabla II.7) a los datos cinéticos de rehidratación.



**Figura II. 22.** Comportamiento de los parámetros RR y COR (muestras con 2 hs de rehidratación), en rodajas de ananá secadas en aire a 45, 60 y 75 °C.

#### 4. Conclusiones

El modelo de transferencia de masa propuesto en el estudio provee una representación matemática sencilla que tiene en cuenta el encogimiento del material para la cinética de secado de frutas con alta humedad como el ananá. El modelo es consistente con la teoría de transferencia de masa y su solución numérica fue validada con resultados experimentales, obteniéndose valores del error promedio porcentual de la estimación en un rango de 4.75 a 9.09 %. En tanto que los valores del error de la estimación de la humedad resultante de la aplicación de la solución analítica (se considera espesor constante) oscilan entre el 5.07 y el 14.5 %.

El *hue* fue el parámetro de color que presentó cambios más significativos y consistentes durante el secado; determinándose una estrecha relación entre este parámetro y el contenido de humedad de la fruta de modo independiente de la temperatura del proceso, por lo que los cambios en el color pueden ser atribuidos simplemente a la concentración de los pigmentos durante la deshidratación.

La máxima retención de AA se obtuvo durante el secado a 45 °C. Se observó que las diferencias en los valores del contenido de AA en la fruta fresca ( $C_0$ ) no afectan la cinética de deterioro.

El modelo que mejor representa la dependencia del encogimiento con el contenido de agua de la fruta durante el secado es el modelo lineal, estableciéndose que dicho comportamiento es independiente de la temperatura del proceso. La contracción en la dirección radial es tres veces menor que la pérdida de espesor.

Los cambios de las propiedades mecánicas durante el secado indican que el producto obtenido se caracteriza por una mayor resistencia a la acompresión, respecto de la fruta fresca. El incremento en el parámetro  $\sigma_{HF}$  es más drástico durante el secado a 45 °C.

La cinética de rehidratación de ananá se incrementa con la temperatura del proceso para las condiciones ensayadas. La rehidratación a 25 °C es independiente de la temperatura de secado, en tanto que a 40 °C presenta relación inversa con la temperatura del pre-tratamiento de secado. Los valores experimentales exhiben un buen ajuste al modelo de Page y el comportamiento antes descrito se refleja en los valores del parámetro  $K$ .

En acuerdo con los resultados del análisis de la cinética de rehidratación, los valores del COR obtenidos indican que el grado de recuperación de humedad del producto disminuye a medida que aumenta la temperatura de secado y muestran poca dependencia con la temperatura de rehidratación, en el rango estudiado.

## Bibliografía

- Arévalo-Pinedo, A.; Murr, F. 2006. Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 76: 562–567.
- Bartolome, A.; Ruperez, P.; Fuster, C. 1996. Freezing rate and frozen storage effects on color and sensory characteristics of pineapple fruit slices. *Journal of Food Science*, 61: 154-156.
- Bernardi, I.; Vullioud, M.; Márquez, C.; De Michelis, A. 2001. Change of volume and area during air dehydration of whole rose hip fruits. *Proceedings of ENPROMER 2001*, Santa Fe, Argentina; vol. III, pp. 1447-1452.
- Braga, A.M.P.; Pedroso, M.P.; Augusto, F.; Silva, M.A. 2009. Volatiles identification en pineapple submitted to drying in an ethanolic atmosphere. *Drying Technology*, 27: 248-257.
- Burden, R.; Faires, J. 1985. *Análisis Numérico*. Grupo Editorial Iberoamérica, México.
- Chapra, S.; Canale, R. 1998. *Numerical methods for engineers with programming and software are applications*. 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- Chiralt, A.; Fito, P.; Barat, J.; Andrés, A.; González-Martínez, C.; Escriche, I.; Camacho, M. 2001. Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering*, 49: 141-151.

- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. 2<sup>nd</sup> edition., Oxford University Press Inc., New York.
- Demirel, D.; Turham, M. 2003. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering*, 59, 1–11.
- Dissa, O.; Desmorieux, H.; Bathiebo, J.; Kouliadiati, J. 2008. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica L. cv. 'Amelie'*) with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 88: 429-437.
- Dobias, J.; Voldrich, M.; Curda, D: 2006. Heating of canned fruits and vegetables: Deaeration and texture changes. *Journal of Food Engineering*, 77: 421–425.
- Feng, H., Tang, J., Dixon-Warren, J. 2000. Determination of moisture diffusivity of red delicious apple tissues by thermogravimetric analysis. *Drying Technology*, 18: 1183-1199.
- Fennema, O.R. 1993 *Química de los Alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
- Geankoplis, C. J. 1983. *Transport processes and unit operations*. 2nd. Edition, Allyn and Bacon Inc, Boston.
- Gekas, V. 2000. *Transport Phenomena of foods and biological materials*. Boca Raton, Florida . CRC Press. Inc., USA.
- Giannakourou, M.C., Taoukis, P.S. 2003. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*, 83: 33-41.
- Hassini, L.; Azzouz, S.; Peczalski, R.; Belghith, A. 2007. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 79: 47-56.
- Hernández, J. A.; Pavón, G.; García, M. A. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 45: 1-10.
- Hossain, M.D., Bala, B.K., Hossain, M.A., Mondol, M.R.A.. 2001. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple, *Journal of Food Engineering*, 48: 103-107.
- Karatas, S., Pinarh, I. 2001. Determination of moisture diffusivity of pine nut seed. *Drying Technology*, 19: 701-708.
- Karim, A.; Hawlader, M.N. 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 70: 35–45.
- Khraisheh, M.A.M.; McMinn, W.A.M.; Magee, T.R.A. 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37: 497–503.
- Krokida, M.; Tsami, E.; Maroulis, Z.B. 1998. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16: 667-685.
- Krokida, M.K.; Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1–7.
- Krokida, M.K.; Philippopoulos, C. 2005. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology*, 23: 799-830.

- Lang, W.; Sokhansanj, S.; Rohani, S. 1994. Dynamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkemas's mathematical simulation of wheat and canola drying. *Drying Technology*, 12: 1687 – 1708.
- Lewicki, P.P. 1998. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36: 81–87.
- Lozano, J.; Ibarz, A. 1997. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 31: 365-373.
- Lozano, J.; Rotstein, E.; Urbicaín, M. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. *Journal of Food Science*, 48: 1497-1502.
- Mandala, I.G.; Anagnostaras, E.F.; Oikonomou, C.K. 2005. Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 69: 307–316.
- Márquez, C.A.; De Michelis, A.; Giner, S.A. 2006. Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglantheria L.*). *Journal of Food Engineering*, 77: 566-574.
- Maskan, M. 2006. Production of pomegranate (*Punica granatum L.*) juice concentrate by various heating methods: colour degradation and kinetics. *Journal of Food Engineering*, 72: 218–224.
- Mayor, L.; Sereno, A. M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61:373-383.
- Miller, E; Hall, G. 1953. Distribution of total soluble solids, ascorbic acid, total acid, and bromelin activity in the fruit of the Natal pineapple (*Ananas Comosus L. MERR.*). *Plant Physiology*, 28: 532–534.
- Mulet, A., 1994. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22: 329–348.
- Nicoleti, J.; Silveira-Junior, V.;Telis-Romero, J.; Telis, V. 2004. Ascorbic acid degradation during convective drying of persimmons with fixed temperature inside the fruit. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, vol. C, 1836-1843.
- Nicoleti, J.F., Telis-Romero, J. and Telis, V.R.N. 2001. Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: Fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. *Drying Technology*, 19: 2175-2191.
- Nogueira, R. I. 1991. Processo de secagem de banana (*Musa acuminiata* subgrupo *Cavendish cultivar nanica*): parâmetros ótimos na obtenção da banana-passa. *Dissertação (Mestrado Faculdade de Engenharia Agrícola)*, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP.
- Nunes, M.C., Brecht, J.K., Morais, A.M.; Sargent, S.A. 1998. Controlling temperature and water loss to maintain ascorbic acid levels in strawberries during postharvest handling, *Journal of Food Science*, 63: 1033-1069.
- Orikasa, T.; Wu, L.; Shiina, T.;Tagawa, A. 2008. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85: 303–308.

- Pardio Sedas, V., Waliszewski Kubiak, K.N.; Garcia Alvarado, M. 1994. Ascorbic acid loss and sensory changes in intermediate moisture pineapple during storage at 30-40°C. *International Journal of Food Science and Technology*, 29: 551-557.
- Prabhanjan, D; Ramaswamy, H.; Raghavan, G. 1995. Microwave-assisted Convective Air Drying of Thin Layer Carrots. *Journal of Food Engineering*, 25: 283-293.
- Karatas, S.; Pinarh, I. 2001. Determination of moisture diffusivity of pine nut seed. *Drying Technology*, 19: 701-708
- Raghavan, G.S.; Venkatachalapathy, K. 1999. Shrinkage of strawberries during microwaves drying. *Drying Technology*, 17: 2309 – 2321.
- Rahman, S.; Lamb, J. 1991. Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Process Engineering*, 14:163–171.
- Ramesh, M.; Rao, P.S. 1996. Drying studies of cooked rice in a vibrofluidised bed drier. *Journal of Food Engineering*, 27: 389-396.
- Ratti, C. 1994. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 25: 91-105.
- Sander, A., Tomas, S., Skansi, D. 1998. The influence of air temperature on effective diffusion coefficient of moisture in the falling rate period. *Drying Technology*, 16: 1487-1499.
- Santos, P.H.S.; Silva, M.A. 2009. Kinetics of L-ascorbic acid degradation in pineapple drying under ethanolic atmosphere. *Drying Technology*, 27: 947-954.
- Semhan, D.; Albertario, E.; Giner, G. 2004. Dehydration of apple and tomato purees into flexible laminates. Heat and mass transfer studies and product characteristics. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004); São Paulo, Brazil, vol. C, 1751-1758.
- Simal, S.; Garau, M.C.; Femenia, A.; Rosselló, C. 2006. A diffusional model with a moisture-dependent diffusion coefficient. *Drying Technology*, 24: 1365-1372.
- Singh, B.; Gupta, A.K. 2007. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79: 459-470.
- Srikiatden, J.; Roberts, J.S. 2006. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, 74: 143–152.
- Suzuki, K.; Kubota, K.; Hasegawa, T.; Hosaka, H. 1976. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, 41: 1189–1193.
- Talla, A.; Puiggali, J.; Jomaa, W.; Jannot, Y. 2004. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64: 103-109.
- Troncoso, E.; Pedreschi, F. 2007. Modeling of textural changes during drying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 82: 577-584.

- Tsami, E.; Katsioti, M. 2000. Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology*, 18: 1559-1581.
- Tudela, J.A.; Espín, J.C.; Gil, M.I.. 2002. Vitamin C retention in fresh-cut potatoes, *Postharvest Biology and Technology*, 26: 75-84.
- Turhan, M.; Erdoğan, F. 2003. Error associated with assuming a finite regular geometry as an infinite one for modeling of transient heat and mass transfer processes. *Journal of Food Engineering*, 59: 291-296.
- Uddin, M.S.; Hawlader, M.N.A.; Luo Ding; Mujumdar, A.S. 2002. Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. *Journal of Food Engineering*, 51: 21-26.
- Varadharaju, N.; Karunanidhi, C.; Kailappan, R. 2001. Coffee cherry drying: a two-layer model, *Drying Technology*, 19: 709-715.
- Vega, A.; Fito, P.; Andrés, A.; Lemus, R. 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (*var. Lamuyo*). *Journal of Food Engineering*, 79: 1460-1466.
- Waliszewski, K.; Corzo, C; Pardo, V.; Garcia, M. 1999. Effect of proteolytic enzymes on color changes in banana chips during osmotic dehydration. *Drying Technology*, 17: 947-954.
- Wang, J.; Chao, Y. 2003. Effect of Co irradiation on drying characteristics of apple. *Journal of Food Engineering* 56: 347-351.
- Zanoni, B.; Peri, C.; Nani, R.; Lavelli, V. 1999. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Research International*, 31: 395-401.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. 1996. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis, *Drying Technology*, 14: 1543-1573.

## **Capítulo III**

### **Deshidratación Osmótica**

## **Resumen**

La deshidratación osmótica es una de las tecnologías de preservación de frutas con amplias posibilidades de desarrollo en las regiones tropicales poco industrializadas debido al bajo insumo energético requerido y a la disponibilidad y bajo costo de algunos agentes osmóticos, como la sacarosa. Se ha observado que las condiciones del proceso en muchos casos definen la calidad final del producto deshidratado. En esta etapa del trabajo se estudió el efecto de la deshidratación osmótica sobre algunas propiedades relacionadas con la calidad del ananá. Para ello se evaluaron propiedades estructurales (contracción), propiedades ópticas (color), propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) y, de modo especial, propiedades nutricionales (pérdida de vitamina C). Complementario y vinculado a la calidad del producto, se analizó la capacidad de rehidratación de la fruta parcialmente deshidratada. Además, se analizó el efecto de la temperatura sobre la cinética de deshidratación osmótica de ananá.

En un trabajo previo (Ramallo, 2001) se analizaron diferentes modelos basados en la solución analítica de la ley de Fick para estimar los coeficientes de difusión de agua y sacarosa durante la deshidratación osmótica de rodajas de ananá en solución de sacarosa. El modelo que considera la contracción de la fruta durante la deshidratación y aplica los términos de orden superior de la solución analítica es el que mejor se aproxima (menor valor del error promedio porcentual de la estimación) a los resultados experimentales del contenido de humedad y de sacarosa. En base a lo anterior, se escogió este modelo para simular el proceso.

## **1. Introducción**

En la actualidad existe un interés mundial en el desarrollo de métodos de conservación de frutas y hortalizas que provoquen la menor cantidad e intensidad de cambios en las características originales del alimento y que, por otro lado, puedan ser utilizados para realzar atributos de calidad específicos de algunos productos mediante la incorporación de aditivos seleccionados. Estos atributos de calidad están principalmente relacionados a características organolépticas y nutricionales. La deshidratación osmótica (OD) es una de las técnicas más frecuentemente citadas porque puede cumplir con los requisitos antes mencionados. Mientras que la aplicación de la OD en manzanas, peras, frutillas, bananas, etc., ha sido extensamente estudiada (Torregiani, 1993; Spiazzi & Mascheroni, 1997; Evans et al., 2002), el potencial de la OD como tratamiento del ananá ha sido mucho menos investigado.

Brevemente, la deshidratación osmótica es una técnica usada para el retirar parcialmente el agua cuando los alimentos (normalmente frutas u otros vegetales) se colocan en una solución hipertónica. Durante el proceso tienen lugar dos flujos a contracorriente: el agua fluye hacia del alimento hacia la solución y el soluto se transfiere de la solución al alimento. Para poder diseñar sus aplicaciones comerciales es necesario contar con los métodos o modelos para la predicción de la transferencia de masa durante el proceso. Una descripción realista de las características físicas de la deshidratación osmótica implica la consideración de la difusión entre las células, dentro del volumen celular y a través de las membranas de la célula (Marcotte & Le Maguer, 1992; Spiazzi & Mascheroni, 1997; Yao & Le Maguer, 1997).

A pesar de ello, en la mayoría de los casos el proceso de OD se modela de una manera sobre-simplificada por medio de la Segunda Ley de Fick. Cuando, además, se supone que las propiedades permanecen constantes y la estructura es homogénea, existe una solución analítica para las formas regulares (Crack, 1975) que tiene la forma de una serie infinita. Una simplificación posterior de la solución analítica a un modelo linear simplificado, que implica el uso solamente el primer término de la serie, puede introducir errores significativos y adicionales a la simplificación del problema físico (Feng et al., 2000). En ese respecto, diversas aproximaciones simplificadas a la solución exacta implican distintos

grados de exactitud en las predicciones de concentraciones y coeficientes de difusión (Azura et al., 1992; Nsonzi & Ramaswamy, 1998; Sabadini et al., 1998; Achariyaviriya et al., 2000).

Los coeficientes de difusión del agua y del soluto son parámetros importantes en el análisis, el diseño y la optimización del proceso de deshidratación osmótica. Según lo indicado previamente, en general, el método de la solución linear de la ley de Fick con el volumen constante (Método de la Pendiente) ha sido ampliamente utilizado para estimar los coeficientes de difusión durante la deshidratación osmótica de diferentes vegetales. Pero, en efecto, durante este proceso el alimento experimenta cambios importantes en su volumen o espesor (Spiazzi & Mascheroni, 1997; Mavroudis et al., 1998; Reppa et al., 1999). Por lo tanto, la suposición del volumen constante introduce fuentes adicionales de error en la predicción de los coeficientes de difusión.

Se han estudiado distintos aspectos de la cinética de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de ananá, bajo diferentes condiciones experimentales, con resultados algunas veces no coincidentes. Waliszewski et al. (2002) analizaron la cinética de pérdida de agua y ganancia de sacarosa durante la deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa combinando las variables concentración (50, 60 y 70 °Brix), temperatura (50, 60 y 70 °C) y pH (6, 7 y 8) en un diseño experimental. Las rodajas de ananá de 6mm fueron seccionadas en seis partes, alejando al modelo físico de la geometría regular denominada "placa plana". Los valores de humedad y contenido de sacarosa en la fruta en el equilibrio se determinaron a partir del ajuste de los datos experimentales al modelo de Azura (Azura et al., 1992). En dicho trabajo, los autores observaron que el coeficiente de difusión del agua no presenta dependencia con las variables del proceso (temperatura, concentración y pH) en el rango de aplicación de las variables. En cambio, demostraron que el coeficiente de difusión del soluto en ananá es dependiente de la temperatura y la concentración de la solución hipertónica, aunque este coeficiente no es afectado por el pH del medio.

Por otra parte, Saputra (2001) concluyó que la concentración y la temperatura tienen efecto significativo sobre la pérdida de agua y la ganancia de sacarosa durante la deshidratación osmótica de rodajas de ananá (variedad *Queen*) de 7 mm de espesor. En el mencionado trabajo se evaluó la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica con solución

de sacarosa y con solución de glucosa, a tres niveles de temperatura (30, 50 y 70 °C), tres niveles de concentración (50, 60 y 70 °Brix) y a tres tiempos de inmersión (3, 6 y 9 h). El efecto de las variables sobre la velocidad de pérdida de masa se evaluó a través del análisis estadístico. Finalmente, se concluyó que la sacarosa tiene mejor capacidad de incrementar la pérdida de agua y reducir la ganancia de soluto que la glucosa y que el mayor valor de transferencia de masa se obtuvo con 9 h de inmersión en solución de sacarosa de 70 °Brix y 50 °C.

Sin embargo, en otro trabajo (Tomasicchio et al., 1986) donde se comparó la eficiencia de los dos azúcares durante la deshidratación de rodajas de ananá de 0.5 cm de espesor, a temperaturas relativamente bajas (25 y 40 °C) y 60 °Brix durante un período de inmersión de 24 hs, se encontró que las condiciones de tratamiento con las que se logra la mayor pérdida de peso y la mayor pérdida de agua es con solución de glucosa a 40 °C. Aquí no se tienen datos de la variedad de ananá utilizado.

De manera análoga, Castro et al. (1998) analizaron el efecto del tiempo de inmersión (1-3 h), temperatura (30-50 °C) y aplicación de vacío pulsante combinando los niveles de estas variables en un diseño experimental. Esto permitió, a través del análisis estadístico, obtener ecuaciones empíricas que relacionan la pérdida de agua y la ganancia de soluto con las variables en cuestión. Los autores encontraron que la pérdida de agua se incrementa con la temperatura y con el tiempo de inmersión. El vacío pulsante ejerció un efecto beneficioso sobre la cinética de transferencia de masa.

La cinética de pérdida de agua y ganancia de soluto durante la deshidratación osmótica de cubos de ananá en solución de sacarosa, en un rango de concentración (40-70 °Brix) y de temperatura (30-50 °C) fue estudiada por Rastogi & Raghavarao (2004). Suponiendo que el proceso osmótico es gobernado por la difusión Fickiana, calcularon los coeficientes de difusión del agua y de la sacarosa aplicando el método de la pendiente. En este trabajo no se evaluó la variación de volumen de los cubos de ananá.

Jena & Das (2005) propusieron un modelo matemático para predecir la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de rodajas de ananá en sistemas a temperatura constante sin agitación. Este modelo involucra, en sus consideraciones teóricas, la difusión Fickiana y una constante llamada “relación de difusión azúcar-agua” y permite predecir el contenido de agua durante el proceso sin conocer los valores de concentración en el

equilibrio. No considera cambios en el espesor de las muestras. El error en las estimaciones involucró una desviación de aproximadamente el 10 %.

En un trabajo previo (Ramallo, 2001) se determinaron experimentalmente los valores del contenido de agua y de sacarosa en el equilibrio, como así también la variación del volumen y el efecto de la temperatura durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá en solución de sacarosa con agitación. Además, y en base a las características antes mencionadas del proceso de deshidratación osmótica, en el mencionado trabajo se desarrolló un modelo simple basado en la solución de la ley de Fick, pero considerando la contracción observada, para predecir la cinética de deshidratación osmótica de las rebanadas de ananá y se cuantificó el efecto del uso de los términos de orden superior de la solución analítica sobre los valores predichos del coeficiente de difusión. Se demostró que la incorporación de la variación de volumen con el contenido de agua en la ecuación solución de la Ley de Fick (mejora el ajuste a tiempos largos de proceso) y el uso de más términos de la solución analítica (mejora el ajuste a tiempos cortos de proceso) permite explicar mejor el movimiento del agua y de la sacarosa durante el proceso de deshidratación osmótica de ananá.

La aplicación de pulsos de alta presión al proceso de deshidratación osmótica aumenta la permeabilidad de la estructura celular (Eshtiaghi et al., 1994). Rastogi & Niranjani (1998) estudiaron el efecto de la aplicación de pulsos de alta presión al inicio del proceso de deshidratación osmótica de cubos de ananá sobre la velocidad de deshidratación. Se encontró que este método es muy efectivo para incrementar la velocidad de deshidratación, ya que el coeficiente de difusión del agua y el del soluto aumentaron con la presión del tratamiento hasta valores de presión de 400 MPa, por encima del cual las variaciones no son significativas. Los exámenes micro-estructurales mostraron que este aumento en la velocidad de deshidratación se debe a que el proceso con alta presión rompe las paredes celulares del tejido vegetal, generando un producto considerablemente menos resistente a la compresión que el de la deshidratación osmótica a presión normal. En resumen, las ventajas logradas con la aplicación de pulsos de alta presión sobre la cinética de deshidratación se anulan con importante pérdida de turgencia de la fruta como resultado de este tratamiento. Las características y cinética de degradación del color son específicas de cada fruta y de las condiciones de procesamiento. Se tienen datos sobre la formación de pigmentación parda,

“enfermedad rosada”, en las rodajas de ananá durante el procesamiento térmico de la elaboración de conservas (Pujol & Kado, 2000). Esta coloración se inicia a través de una reacción de glucosa a gluconato con posterior oxidación del gluconato. Chutintrasri & Noomhorm (2007) evaluaron los cambios de color durante el procesamiento térmico (70-110°C) de puré de ananá; encontraron que los valores del parámetro *L* disminuyen linealmente, los valores de *a* se incrementan y los de *b* disminuyen durante el tratamiento térmico. Estos cambios son más importantes en la medida que aumenta la temperatura del proceso, describiendo una tendencia del tono amarillo al rojo.

Pocos datos se tienen sobre el efecto de las condiciones del procesamiento osmótico sobre las cualidades ópticas del ananá. Tan et al. (2001) evaluaron los cambios en el color de paralelepípedos de ananá de 20x20x5 mm durante el proceso de deshidratación osmótica a temperatura ambiente, variando la concentración de la solución de sacarosa (30-50-70 °Brix). Los autores observaron que los cambios de color fueron similares para todos los tratamientos, con una disminución del parámetro *L*, siendo éste la medida del color que más contribuyó a los cambios globales del mismo.

La pérdida de ácido ascórbico en el tejido vegetal durante la deshidratación osmótica puede seguir dos caminos: por ser muy soluble en agua, una vía de pérdida es la lixiviación, difusión o arrastre hacia la solución osmótica; y por ser un compuesto muy termolábil, una segunda vía de pérdida es la reacción de deterioro químico, cuyo efecto se acentúa con la temperatura de trabajo. Buchweitz (2005) cuantificó el contenido de vitamina C en la solución hipertónica durante la deshidratación osmótica de kiwi y registró un importante incremento de su concentración durante las dos primeras horas de proceso, lo cual refuerza la hipótesis de pérdida por difusión hacia la solución osmótica. Peiró et al. (2006) llegaron a conclusiones similares midiendo el contenido de ácido ascórbico en la fruta y en la solución durante el proceso de deshidratación osmótica de pomelo. En este trabajo se registró una pérdida de 6 mg de vitamina C en 100 g de fruta al mismo tiempo que la solución de sacarosa ganaba 1.3 mg/100 g de solución. Por otro lado, Cao et al. (2006), estudiando la influencia de las variables sobre el proceso de deshidratación osmótica de kiwi, encontraron que la temperatura es la variable que más incide en la pérdida de vitamina C y que la mayor pérdida del nutriente ocurre en los primeros estados de ósmosis.

Estos resultados estarían indicando que simultáneamente se produce la migración hacia la solución hipertónica y la reacción química de degradación del ácido ascórbico.

Debido a que numerosos factores afectan la estabilidad del ácido ascórbico (Fennema, 1993), y que el flujo de agua presenta diferentes velocidades de difusión en función de la naturaleza del tejido vegetal (Waliszewski et al., 1997; Nsonzi & Ramaswamy, 1998; Rastogi & Raghavarao, 1998; Kaymak-Ertekin & Sultanoğlu, 2000; Salvatori & Alzamora, 2000; Nicoletti et al., 2001), la pérdida de vitamina C durante el proceso de deshidratación osmótica puede ser diferente de una fruta a otra. No se tienen registros en la literatura acerca de la evolución del ácido ascórbico durante la deshidratación osmótica de ananá.

Por otra parte, durante el proceso de deshidratación osmótica de ananá puede ocurrir algún daño en la estructura del tejido vegetal, el cual se comprobó que está vinculado a las condiciones del proceso (Rastogi & Niranjana, 1998). Esta disrupción en la matriz celular puede afectar la capacidad de rehidratación del producto obtenido, como ha sido observado por Rastogi et al. (2000) durante la deshidratación osmótica de ananá con aplicación de pulsos de alta presión. Por otra parte, pocos datos se tienen de las propiedades de rehidratación de ananá parcialmente deshidratado.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Preparación de la muestra**

Se trabajó con frutas de *Ananas Comosus variedad Cayena Lisa* en grado de madurez comercial y textura aún firme, obtenida en locales comerciales. Las frutas fueron lavadas con abundante agua, peladas manualmente y cortadas en medias rodajas de  $0.60 \pm 0.05$  cm de espesor y  $11.5 \pm 0.5$  cm de diámetro; con un sacabocados se les retiró el centro.

### **2.2 Condiciones de deshidratación osmótica**

La solución hipertónica se preparó disolviendo 6 kg de sacarosa de calidad comercial en 4 litros de agua desmineralizada (60 °Brix).

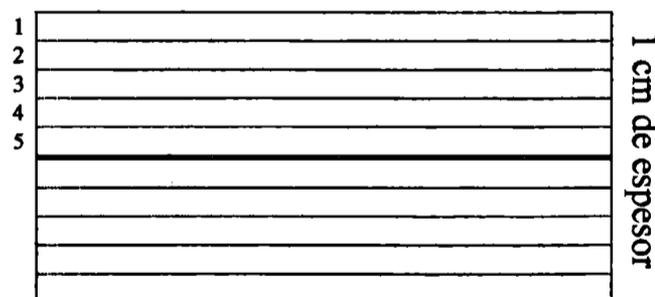
Una característica negativa en la operación de inmersión de la fruta en el jarabe es la flotación. Esto es debido a la menor densidad de la fruta (5 a 6 veces menos °Brix que el jarabe) y además a los gases que esta puede tener ocluidos. Cuando se intenta sumergir toda la masa de fruta dentro del jarabe se forma un bloque compacto de trozos que impiden la

circulación del jarabe a través de cada trozo, imposibilitando el buen contacto de la fruta con la solución.

Para evitar este inconveniente, el proceso se llevó a cabo sumergiendo canastos de material plástico de malla abierta conteniendo cuatro muestras cada uno, en solución de sacarosa a temperatura constante, con agitación y de un volumen tal que garantizase concentración constante de azúcar en el jarabe durante todo el proceso (relación masa jarabe/masa de fruta mayor que 10/1). La agitación de la solución se realizó empleando un agitador eléctrico con hélice circular de 8 cm de diámetro. A intervalos de tiempo preestablecidos se extrajeron muestras de fruta, se las enjuagó con agua desmineralizada durante 3-5 segundos con el propósito de quitar el jarabe adherido a la superficie y el exceso de agua superficial proveniente de esta última etapa se eliminó con papel tissue; a continuación se registró el peso individual de cada muestra. Se midió el espesor ( $L$ ) en tres puntos de la media rodaja con un calibre y se tomó el valor promedio como dato de espesor para el estudio de la variación de volumen. De inmediato se midió el color y se fraccionaron las muestras para la evaluación del contenido de vitamina C, el contenido de azúcares y la humedad. Estos dos últimos datos se utilizaron para construir las curvas de cinética de deshidratación.

Este procedimiento se realizó a tres temperaturas diferentes (30, 40 y 50 °C) y por triplicado, excepto a 40 °C donde se realizaron seis curvas de cinética de deshidratación osmótica para analizar mejor la dispersión de los resultados.

### 2.3 Estudio del perfil de concentraciones



**Figura III. 1.** Esquema de una media rodaja de ananá (placa plana) donde se muestra la forma en que se seccionó la fruta para analizar el perfil de concentraciones.

Con el objetivo de obtener datos del perfil de contenido de humedad y de azúcar que se genera dentro de la fruta durante el proceso de deshidratación osmótica se trabajó con

medias rodajas de ananá de 1 cm de espesor. Luego del período de ósmosis se enjuagó cada muestra con agua desmineralizada y se secó superficialmente con papel tissue. De inmediato se seccionó en finas capas de aproximadamente 0.1 cm de espesor, utilizándose a tal fin un bisturí quirúrgico. Estas fracciones se identificaron de acuerdo a su posición original en la fruta (desde la capa más externa, en contacto con la solución hipertónica, a la más próxima al centro del sólido), como se muestra en la Figura III.1. A cada una de estas fracciones se le determinó el contenido de humedad y de azúcares.

## **2.4 Consideraciones teóricas de la transferencia de masa**

### **2.4.1 Modelo sencillo de transferencia de masa basado en la Segunda Ley de Fick**

El modelo físico de deshidratación osmótica puede describirse así:

- Producto: material sólido, homogéneo y uniforme, cuya geometría se asimila a una placa plana infinita de espesor  $e$
- Por inmersión de este producto (rodajas de ananá) en una solución hipertónica se producen dos movimientos difusivos:
  - a) difusión del agua desde el interior del sólido hacia la superficie, la que se mantiene a concentración constante  $W_e$
  - b) difusión de un soluto (sacarosa) desde una solución bien agitada hacia el interior del sólido.
- La concentración del soluto en la solución se mantiene uniforme y constante. Esta condición se consigue empleando una relación volumen de solución a volumen de fruta mayor que 10.
- Resistencia externa a la transferencia de masa despreciable, lograda con agitación de la solución hipertónica
- No se producen cambios de volumen en las rodajas de fruta durante el proceso de deshidratación ( $e = \text{constante}$ )

Este fenómeno de difusión unidimensional puede describirse con la Segunda Ley de Fick de la difusión (Crank, 1975):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{III.1}$$

Donde:

- C = concentración (de agua o de sacarosa)
- $D_{ef}$  = coeficiente de difusión efectivo o aparente
- t = tiempo
- x = distancia desde el centro de la placa

Condiciones iniciales:

- la concentración de agua en las rodajas de ananá a tiempo cero es  $W_0$  (distribución uniforme de humedad)

$$W = W_0 \quad -l < x < l \quad t = 0$$

- la concentración de sacarosa en las rodajas de ananá a tiempo cero es  $S_0$  (concentración inicial uniforme)

$$S = S_0 \quad -l < x < l \quad t = 0$$

$l =$  mitad del espesor de la placa  $= e/2$

Condiciones de frontera:

- la velocidad a la cual el agua sale de la fruta es la misma a la cual entra a la solución hipertónica de sacarosa
- la velocidad a la cual el soluto (sacarosa) abandona la solución es la misma a la cual entra a la superficie de la placa plana (fruta)

$$a \frac{\partial C}{\partial t} = \pm D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad x = \pm l \quad t > 0 \quad (III.2)$$

a = parámetro relacionado al volumen de la solución

Para integrar la ecuación diferencial de la Segunda Ley de Fick es necesario establecer la concentración de agua y de soluto (azúcar) en la superficie del sólido durante el proceso de deshidratación. Una manera de hacerlo es suponer que la concentración en la superficie de la fruta es la misma que en la solución. Esto podría ser erróneo de existir un factor de partición  $k$  diferente a la unidad, entonces se escribe  $a/k$  en lugar de  $a$  en la Ecuación III.2. Conocer el factor de partición es el equivalente a conocer la concentración en el equilibrio. En el presente trabajo la concentración en la superficie de la fruta se considera igual a la concentración en el equilibrio (tiempo de deshidratación osmótica muy grande).

La solución de la Ecuación III.1 promediada en el volumen, (Crank, 1975), considerando que hay algo de soluto inicialmente presente en el sólido (ananá), puede escribirse:

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-Dw_{ef}(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t\right\} \quad (III.3)$$

$$\frac{S - S_e}{S_o - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-Ds_{ef}(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4l^2} t\right\} \quad (III.4)$$

Donde  $Dw_{ef}$  y  $Ds_{ef}$  es el coeficiente de difusión efectivo ( $m^2s^{-1}$ ) para la pérdida de agua o la ganancia de soluto respectivamente;  $t$  es tiempo (s);  $l = e/2$  es mitad del espesor de la placa (m);  $W$  es el contenido medio de agua en la fruta a tiempo  $t$  (kg de agua/kg de fruta);  $S$  es el contenido medio de sacarosa en la fruta a tiempo  $t$  (kg de sacarosa/kg de fruta); los subíndices  $o$  y  $e$  indican condiciones iniciales ( $t = 0$ ) y condiciones de equilibrio ( $t = \infty$ ).

Una característica importante de estas series (Ecuaciones III.3 y III.4) es que los exponenciales tienden rápidamente a cero a medida que crece el tiempo, por lo que los métodos simplificados obvian los términos de orden superior. Para ilustrar la convergencia de la serie, si se asigna al producto  $D_{ef} (\pi/2l)^2$  un valor de  $10^{-3} \text{ min}^{-1}$  (valor típico de la difusión del agua en alimentos durante procesos de deshidratación) se observa que el segundo término de la serie es aproximadamente el 10 % del primer término aún para valores pequeños del tiempo (10 minutos). En el caso particular de la deshidratación osmótica del ananá en solución de sacarosa, conociendo (*a priori*) el orden de los valores de  $l$ ,  $Ds_{ef}$  y  $Dw_{ef}$  se puede inferir un valor del tiempo desde el cual sería aceptable la solución del método de la pendiente, el cual consiste en utilizar solo el primer término de la serie. Con este procedimiento se encontró que para un valor del tiempo de deshidratación de 30 minutos el segundo sumando es de aproximadamente el 5 % del primero y para un valor del tiempo de 120 minutos el segundo término vale tan solo el 0.75 % del primero.

Por otra parte, de los ensayos experimentales se observó que las muestras de ananá sufren un importante encogimiento durante el proceso de deshidratación en solución de sacarosa y que esta disminución del espesor es función de la pérdida de agua en la fruta. En base a estas observaciones se escogió un modelo más elaborado que contemple el fenómeno del encogimiento de la fruta en las ecuaciones matemáticas.

El modelo utilizado para describir el movimiento de agua y de soluto durante la deshidratación osmótica de ananá se caracteriza por considerar:

- los tres primeros términos de la serie solución de la ecuación diferencial de Fick para placa plana
- coeficientes de difusión del agua y del azúcar constantes
- espesor de la placa variable con el contenido de humedad, durante el proceso de deshidratación (Ecuación III.7).

Las ecuaciones resultantes toman la forma de las series solución resultantes de la integración analítica (Crank, 1975) con la modificación de que el término del espesor  $l$  (constante) se cambia por su equivalente dependiente del contenido de humedad (Ecuación III.11).

$$\frac{\bar{W} - W_e}{W_o - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \begin{aligned} & \exp \left\{ -Dw_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} + \\ & + \frac{1}{9} \exp \left\{ -9Dw_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} + \\ & + \frac{1}{25} \exp \left\{ -25Dw_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} \end{aligned} \right\} \quad (III.5)$$

$$\frac{\bar{S} - S_e}{S_o - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \begin{aligned} & \exp \left\{ -Ds_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} + \\ & + \frac{1}{9} \exp \left\{ -9Ds_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} + \\ & + \frac{1}{25} \exp \left\{ -25Ds_{ef} \frac{\pi^2}{(2l_o (0.99 + 0.24 \ln(w/w_o)))^2} t \right\} \end{aligned} \right\} \quad (III.6)$$

Por regresión no lineal de los resultados experimentales expresados como  $(W-W_e)/(W_o-W_e)$  versus el tiempo, y  $(S-S_e)/(S_o-S_e)$  versus el tiempo se obtuvieron los valores de  $Dw_{ef}$  y  $Ds_{ef}$ .

### 2.5 Variación del volumen durante la deshidratación

En cada experiencia de deshidratación osmótica y a diferentes tiempos de tratamiento, se midió el espesor de las medias rodajas de ananá con un calibre manual sobre dos muestras

cada vez, en tres puntos de cada muestra. El valor del espesor a cada tiempo fue expresado como la media de los valores medidos. Por tratarse de un proceso de transferencia de materia unidireccional el efecto del encogimiento, traducido como un factor de volumen ( $S_V$ ), puede escribirse (Mavroudis et al., 1998):

$$S_V = e/e_0$$

Se analizó la dependencia del factor de volumen ( $S_V$ ) con el contenido de humedad adimensional,  $W/W_0$  ( $W$  es el contenido de agua actual y  $W_0$  es el contenido de agua inicial), aplicando diferentes modelos de regresión. Se consideró que el modelo que mejor representa el comportamiento del sistema es aquel que presente el más alto coeficiente de correlación.

Para evaluar la influencia de la temperatura sobre la velocidad de variación de volumen se analizaron individualmente los resultados experimentales obtenidos a cada temperatura.

## **2.6 Determinación de humedad, acidez, pH y sólidos solubles**

Se homogeneizó una parte de ananá en diez partes de agua destilada en un mixer durante 1 minuto, a velocidad media.

La acidez total se determinó por titulación ácido-base. A 100 ml de la solución sobrenadante se agregaron 3 gotas de solución de fenolftaleína al 1 % y se tituló con hidróxido de sodio 0.1N hasta cambio de coloración (pH = 8.1). Los resultados de acidez fueron expresados en g de ácido cítrico por 100 g de fruta (AOAC, 1984).

El pH fue determinado sobre 50 ml de la solución obtenida con el mixer, con un pHmeter marca Micronal, modelo B474.

La concentración de sólidos solubles en la fase líquida se determinó a través de la lectura directa de los °Brix del jugo de la fruta, utilizando un refractómetro ABBE, Carl Zeiss JENA. El jugo de la fruta se obtuvo por simple compresión. Estas medidas se realizaron por triplicado, cada una sobre una muestra diferente.

El contenido de humedad se determinó gravimétricamente, mediante secado de una masa de aproximadamente 4 g en estufa a 75 °C hasta pesada constante (48 h aproximadamente).

## **2.7 Cuantificación de ácido ascórbico**

La metodología fue descrita en el *Capítulo II: Secado*.

## **2.8 Determinación del contenido de azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa)**

**Proceso de extracción:** cada muestra de fruta a analizar se pesó, se trituró en mortero durante 10 minutos y se dejó macerar en solución acuosa de etanol al 80 % a 75 °C durante una hora con agitación esporádica. La proporción fue de aproximadamente 2.5 g de fruta por cada 80 ml de solución. Finalizado el tiempo de extracción, se filtró sobre papel de filtro y se enjuagó el residuo sólido con 20 ml de solución etanólica. Se registró el volumen final del filtrado y se conservó el mismo en heladera hasta su análisis cromatográfico.

**Determinación cuantitativa:** se realizó mediante cromatografía líquida (HPLC) en un equipo *Shimatzu*. Para ello se trabajó en forma isocrática utilizándose una columna Amino NH<sub>2</sub> (250 mm x 4.6 mm), fase móvil acetonitrilo:agua (75:25) a una velocidad de flujo de 1.5 ml/min, utilizando un detector de Índice de Refracción.

Se realizaron curvas de calibrado con soluciones patrón de glucosa, fructosa y sacarosa a diferentes concentraciones. Los resultados mostraron comportamiento lineal del área del pico con la concentración en los tres casos.

## **2.9 Hidrólisis de sacarosa durante la deshidratación osmótica del ananá**

Se realizó una prueba de hidrólisis del soluto (sacarosa) en jugo de ananá, en un intento de simular las condiciones del interior de la fruta. Se trabajó sobre dos frutas diferentes, en cada una de ellas en dos condiciones de extracción.

*Extracto 1:* se dejó escurrir el líquido de la fruta, considerando su composición similar a los líquidos contenidos en los espacios extracelulares.

*Extracto 2:* se trituró la fruta en mortero por 15 minutos, con el objetivo de extraer también compuestos del interior de las células.

Los jugos obtenidos se filtraron a través de papel Whatman N° 3, se extrajo una alícuota de cada uno para análisis de la composición por cromatografía líquida, luego se agregó a cada extracto el 2 % en peso de sacarosa y se repitió el análisis. Para determinar el error de la técnica, cada extracto líquido obtenido (Extracto 1 y Extracto 2 de la Fruta 1; y Extracto 1 y Extracto 2 de la Fruta 2) se separó en tres partes que se analizaron individualmente. Se colocaron los erlermeyers (tres por extracto) conteniendo los jugos azucarados, tapados

para evitar evaporación, en un baño a  $45 \pm 1$  °C durante 20 horas. A intervalos de tiempo preestablecidos se extrajo un mililitro del líquido para su inmediato análisis cromatográfico.

### 2.10 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la fruta fresca y deshidratada se evaluaron a través de ensayos de compresión uniaxial de cilindros de ananá de 22 mm de diámetro y altura variable con el grado de deshidratación de las muestras (de 3 a 6 mm), utilizándose a tal fin un Texturómetro Universal (TA-XT2i Texture Analyser). Se utilizó un plato de acrílico de 60 mm, el cual fue lubricado con silicona para evitar el efecto de la fricción fruta-plato. La velocidad de compresión aplicada fue de 1mm/s hasta el 80 % de deformación de la altura original de la muestra. Estos ensayos se realizaron sobre cinco muestras, a cada tiempo de procesamiento, tomándose la media de estas cinco medidas.

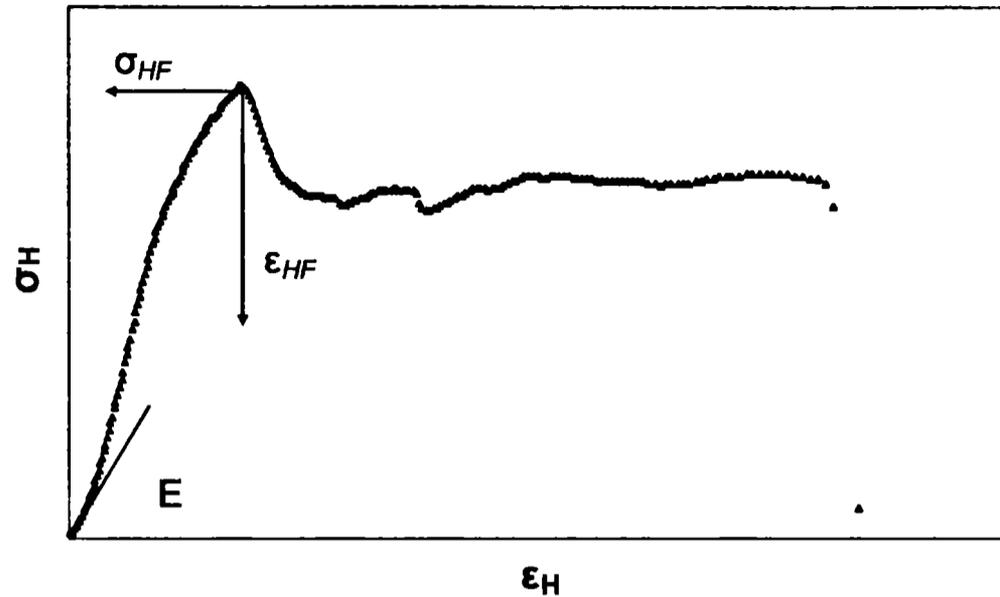
Durante los ensayos, en una computadora conectada al texturómetro, se registraron los datos de fuerza  $F(t)$  (N) y altura  $H(t)$  (m). Estos datos fueron posteriormente convertidos a los parámetros de Hencky: tensión ( $\sigma_H$ ) y deformación ( $\epsilon_H$ ), suponiendo volumen constante durante la compresión (Rodrigues et al., 2003; Chiralt et al., 2001), de acuerdo a las Ecuaciones III.7 y III.8.

$$\sigma_H = \frac{F(t)H(t)}{H_0 A_0} \quad (III.7)$$

$$\epsilon_H = -\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) \quad (III.8)$$

Donde  $A_0$  es el área inicial ( $m^2$ ) y  $H_0$  es la altura inicial (m) de la muestra.

La forma general de la respuesta mecánica del tejido vegetal se muestra en la Figura III.2. En esta figura se observa una relación tensión-deformación inicial de tipo lineal o respuesta elástica del sistema (Chiralt et al., 2001). A mayores niveles de deformación se produce la fractura de la muestra dando lugar a los parámetros  $\sigma_{Hf}$  (tensión de falla o fractura) y  $\epsilon_{Hf}$  (deformación a la fractura), asociados al punto máximo de la curva deformación-tensión.



**Figura III. 2.** Propiedades mecánicas en una curva de compresión uniaxial de cilindros de ananá de 6 mm de espesor

Un material sólido elástico ideal sigue la Ley de Hooke, en la cual tensión y deformación están linealmente relacionadas. La constante de proporcionalidad que relaciona  $\sigma_H$  y  $\epsilon_H$  es llamada módulo elástico o modulo de compresión (E).

El módulo elástico o modulo de compresión (E), considerado como una medida de la resistencia elástica del sistema, fue calculado como la pendiente inicial de la curva  $\sigma_H$ - $\epsilon_H$ , cuando la deformación  $\epsilon_H$  no supere el 6 % (Mao et al., 2000; Ribeiro et al., 2003; Renkema et al., 2001):

$$E = \left( \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)_{\epsilon \rightarrow 0} \quad (III.9)$$

### 2.11 Evaluación instrumental del color

La lectura instrumental del color se realizó con un Colorímetro Triestímulo HunterLab® D25A-9. La metodología fue descrita en detalle en el *Capítulo II: Secado*.

Las medidas del color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , en paralelo con los correspondientes  $L$ ,  $a$  y  $b$ , se realizaron sobre la fruta fresca y deshidratada, en cada caso se tomaron de tres a cuatro muestras para formar un lecho opaco y los valores se registraron como la media de cuatro mediciones. Se utilizaron los siguientes parámetros del color para evaluar los cambios ocurridos en la fruta durante el tratamiento osmótico:

- Diferencia de color global =  $\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}$  (III.10)
- Ángulo hue =  $\tan^{-1}(b/a)$

-  $Chroma = (a^2 + b^2)^{1/2}$

donde:  $\Delta a = a - a_0$ ;  $\Delta b = b - b_0$ ;  $\Delta L = L - L_0$

### 2.12 Rehidratación

Los ensayos de rehidratación se llevaron a cabo sobre medias rodajas de ananá al final de los procesos de deshidratación osmótica a 40 °C y 50 °C. Se eligieron diferentes tiempos de deshidratación de manera de lograr un contenido de agua de aproximadamente 150 % b.s. Estos tiempos se estimaron en 240 y 190 minutos, respectivamente, No se efectuó la rehidratación de ananá deshidratado a 30 °C debido a que el tiempo necesario para lograr un contenido de agua de 150 %b.s. es de aproximadamente 600 minutos y se puede considerar que el proceso es ineficiente a esta temperatura. Cada experimento de rehidratación de ananá deshidratado por ósmosis se realizó por triplicado.

La metodología experimental fue descrita con detalle en el *Capítulo II: Secado*

Se utilizó el modelo de Page para describir la ganancia de agua durante la rehidratación a temperatura constante (Ecuación II.22). La habilidad de rehidratación se cuantificó en términos de la relación de rehidratación (RR) y del coeficiente de rehidratación (COR), de acuerdo a las Ecuaciones II.19 y II.20:

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Caracterización de la fruta fresca

Se analizaron 20 frutas de *ananá comosus* para proveer caracterización fisicoquímica de las frutas utilizadas en este estudio. Los resultados se presentan en la Tabla III.1.

**Tabla III. 1.** Características fisicoquímicas de ananá fresco

Peso por fruta (g)	2100 ± 200 g
Sólidos solubles (°Brix)	12.02 ± 1.45
Acidez total (g de ácido cítrico/100 g fruta)	0.65 ± 0.18
pH	3.5 ± 0.3
Contenido de humedad (g de agua/100g fruta)	85.9 ± 1.9
Contenido de humedad (g de agua/100g sólido seco)	631.7 ± 94.4
Tensión de fractura o módulo de tensión de Hencky (H)	40 ± 5 kPa
Módulo de deformación de Hencky (H)	0.31 ± 0.07
Módulo de compresión (E)	80 ± 17 kPa

### **3.2 Observaciones al microscopio**

Se sabe que dentro de cada fruta existen diferentes tipos de células con funciones diversas. Debido a que el ananá está formado por un conjunto de frutos (ojos), en esta etapa se pretende observar la forma y tamaño de las células durante el proceso de deshidratación osmótica, como así también la resistencia de las mismas al flujo de agua.

Se analizaron al microscopio cortes transversales de medias rodajas de ananá fresco y ananá sometido a una deshidratación osmótica en solución concentrada de sacarosa. Estos cortes se efectuaron con un micrótopo en lonjas de 0.05 mm de espesor aproximadamente. La observación de los cortes al microscopio se realizó de dos maneras: con coloración de los cortes y sin coloración de los mismos.

Sin colorear, se observaron cortes de ananá fresco y en dos estados de deshidratación: con dos horas y seis horas de tratamiento osmótico. Con coloración se observaron únicamente los cortes de ananá fresco, ya que de llevarse a cabo este procedimiento en los cortes de fruta deshidratada se altera las condiciones de deshidratación, puesto que los colorantes empleados son soluciones acuosas diluidas. De estas observaciones se pudo apreciar lo siguiente:

- *En cortes coloreados de fruta fresca*

Las células que cubren los canales grandes (canales que se visualizan sin necesidad de microscopio) son del tipo de células epiteliales cuya función es impedir la pérdida de humedad del fruto.

Se comprobó su impermeabilidad al dejar los cortes en azul de metileno: la región próxima a estas células no tomó coloración, debido a que la solución acuosa coloreada no pudo atravesar esta fina capa de células epiteliales. Esta observación es importante ya que en principio se podría suponer que el área en contacto con la solución hipertónica es muy grande al considerar la existencia de dichos canales.

- *En cortes sin colorear de fruta fresca*

A pesar de que la fruta presenta regiones amorfas muy ricas en pectinas con agua fuertemente ligada, donde no pueden suponerse válidas las leyes de difusión en sólidos porosos, es muy difícil definir la fracción en volumen que ocupan estas células, aunque puede ser considerada despreciable, ya que es mucho menor que la fracción de células del

tipo citoplasmáticas. Esta observación ayuda a fundamentar la aplicación del modelo difusivo de Fick. Las dimensiones medias de las células se ilustran a través de la Figura III.3

Se observó además:

- ✓ paredes celulares, pero no se diferenció la membrana celular ni las vacuolas
  - ✓ presencia de cristales de oxalato de Calcio en el interior de algunas células intactas
  - ✓ presencia de aire en espacios extracelulares: burbujas muy pequeñas y en baja proporción (aproximadamente el 1 % en volumen)
  - ✓ la forma de las células es redondeada
- *En cortes sin colorear de muestras deshidratadas osmóticamente al 50% del contenido de humedad inicial (2 horas de tratamiento)*

Las células se presentan deformadas, alargadas o elípticas, y con gran cantidad de burbujas de aire (aparentemente extracelular). No es notoria la variación de tamaño de las mismas, aunque si lo es la variación de la forma. Ya no se observan células con forma esférica. El eje mayor de la elipse se mantiene en aproximadamente en 80  $\mu\text{m}$ , en tanto que el eje menor es muy variable (entre 35 y 70  $\mu\text{m}$ ). La distribución de tamaños se ilustra en la Figura III.3.

- *En cortes sin colorear de muestras deshidratadas osmóticamente en un grado de deshidratación importante (6 horas de tratamiento)*

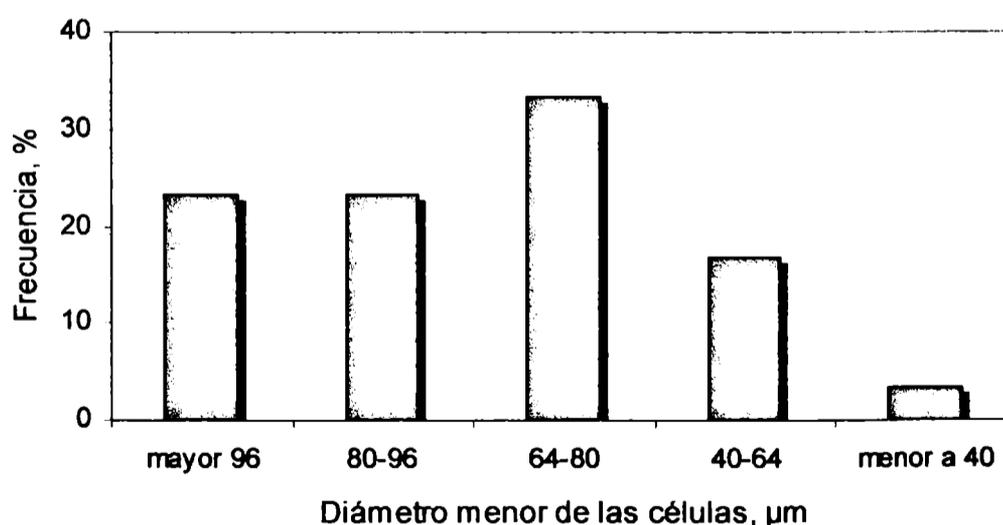
Se observó:

- ✓ presencia de muchos cristales de oxalato distribuidos al azar, lo que indica existencia de células rotas
- ✓ presencia de células anormalmente grandes, intactas, sin deformar y con cristales de oxalato en su interior; con la apariencia de no haber sido afectadas por el proceso de deshidratación
- ✓ deformación de las células del tejido, tornándose elípticas, aunque esa deformación no es uniforme en todas las direcciones
- ✓ importante contenido de burbujas de aire (30 % del volumen aproximadamente). Estas burbujas se aglomeran en el interior del corte, muy pocas en espacios cercanos a la superficie en contacto con la solución hipertónica
- ✓ las células de la epidermis impermeable de los grandes canales se presentan intactas.

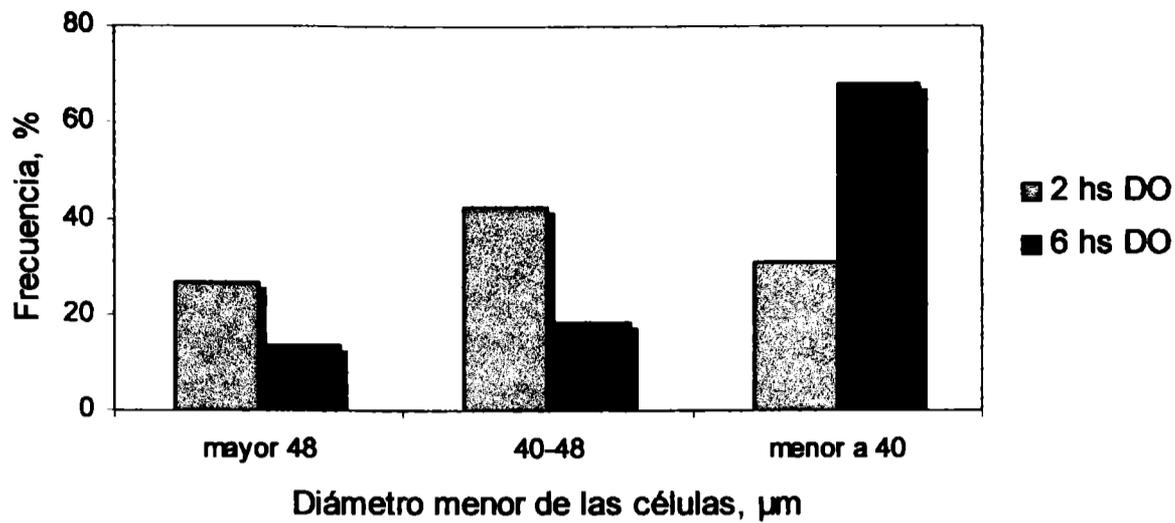
En conclusión, las observaciones muestran un material fresco notoriamente heterogéneo, con células que presentan comportamiento (permeabilidad y deformación) muy diferente unas de otras, en el cual no resulta práctico plantear un modelo microscópico estructural para describir el movimiento de agua y de soluto durante el proceso de deshidratación osmótica.

El proceso de DO genera cambios en la forma y tamaño de las células (Figuras III.3 y III.4) y, en consecuencia, de los espacios intercelulares, aumentando la cantidad y tamaño de dichos espacios. Estos últimos resultados están en concordancia con los presentados por Lewicki & Porzecka-Pawlak (2005) durante la deshidratación osmótica de manzana. Los autores observaron un 30 % de aumento en los espacios intercelulares a los 120 minutos de ósmosis. A los 180 minutos de tratamiento registraron que se incrementa el número de pequeños espacios intercelulares al tiempo que disminuye el número de grandes espacios. Estos últimos resultados presentan gran diferencia con nuestras observaciones en tejido de ananá puesto que a los 360 minutos de tratamiento se observó una disminución en el número de pequeños espacios intercelulares y se acrecentó el tamaño de algunos espacios o canales.

Ferrando & Spiess (2001) muestran un incremento en el número y tamaño de los espacios intercelulares durante la deshidratación osmótica de cebolla y, además, que este comportamiento es afectado por el tipo de agente deshidratante aplicado.



**Figura III. 3.** Distribución de frecuencia del diámetro medio de las células de tejido de ananá fresco, de forma aproximadamente esférica



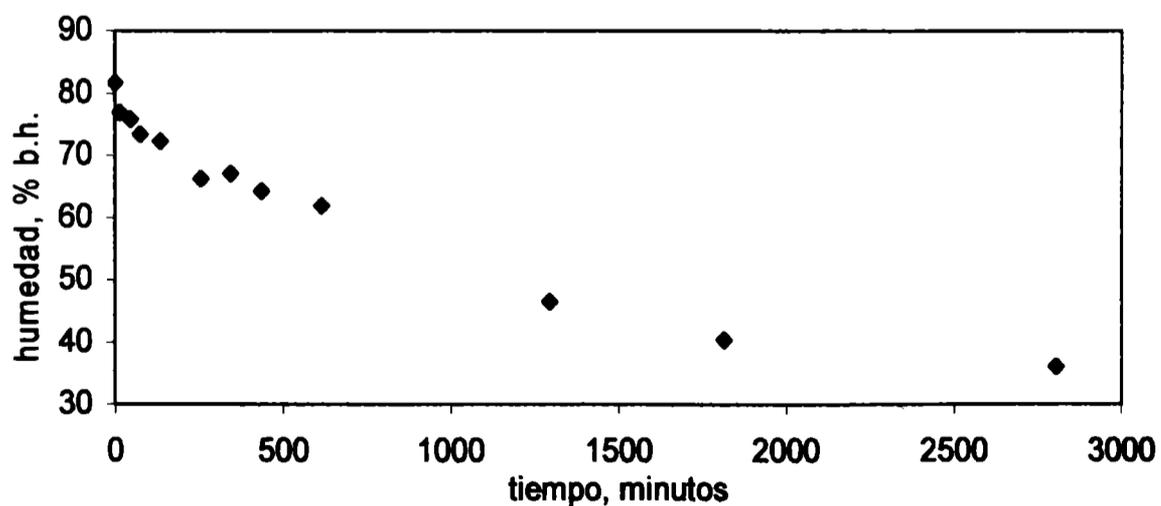
**Figura III. 4.** Distribución de frecuencia del eje menor de las células de tejido de ananá, de forma aproximadamente elíptica, con 2 y 6 horas de deshidratación osmótica

### 3.3 Transferencia de masa

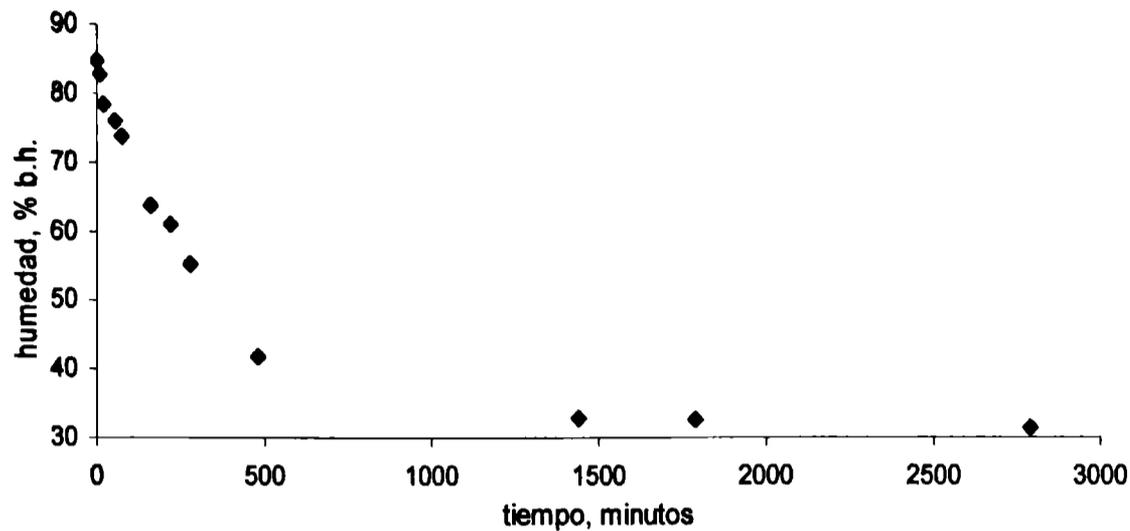
#### 3.3.1 Resultados experimentales de pérdida de humedad

Todas las experiencias se llevaron a cabo sobre medias rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor en solución hipertónica de sacarosa.

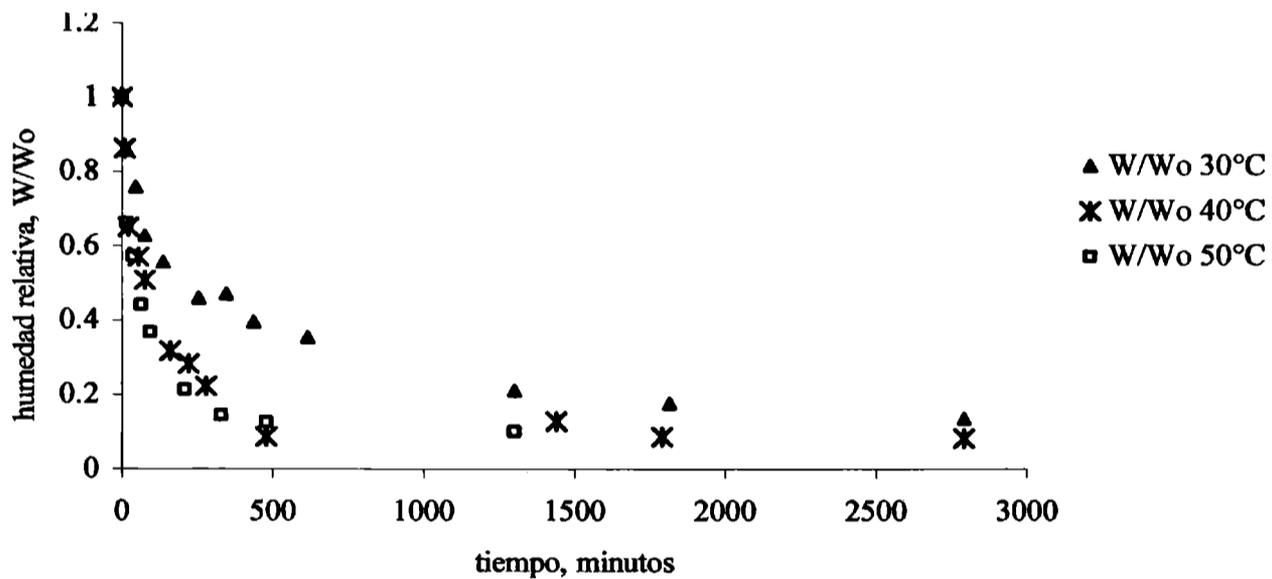
Los gráficos típicos de variación del contenido de agua con el tiempo se presentan en las Figuras III.5 y III.6. La Figura III.7 representa la variación del contenido de agua relativa al contenido inicial ( $W/W_0$ ) a las tres temperaturas de trabajo; en las experiencias representadas en estas figuras no existe mayor diferencia en los datos experimentales obtenidos a 40 y a 50 °C.



**Figura III. 5.** Contenido de agua (g en 100g de producto) en un proceso de deshidratación osmótica de rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor en solución de sacarosa a 30 °C.



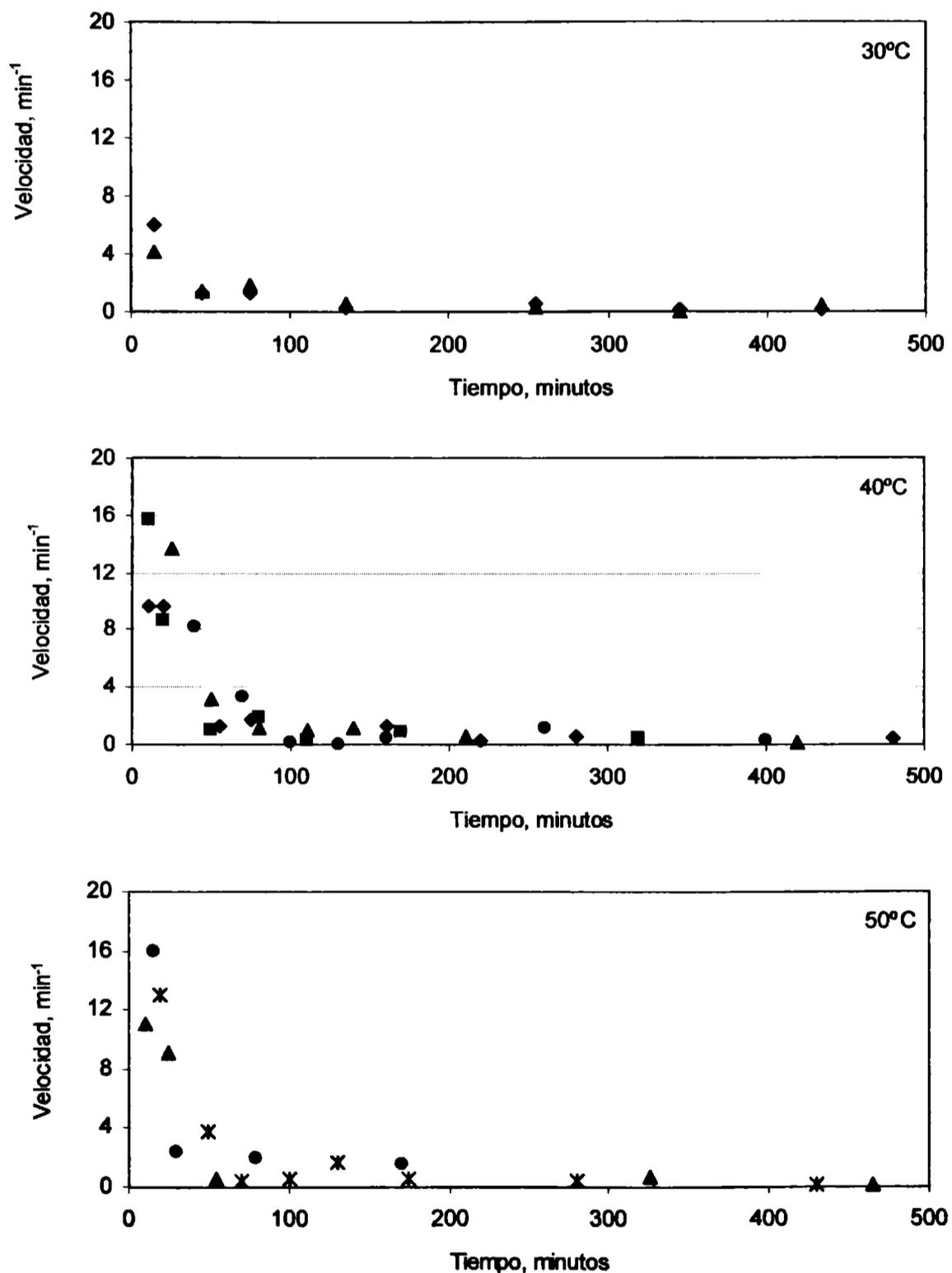
**Figura III. 6.** Variación del contenido de agua durante la deshidratación osmótica de rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor en solución de sacarosa a 40°C.



**Figura III.7.** Contenido de agua relativo al valor inicial, durante procesos de deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa a diferentes temperaturas.

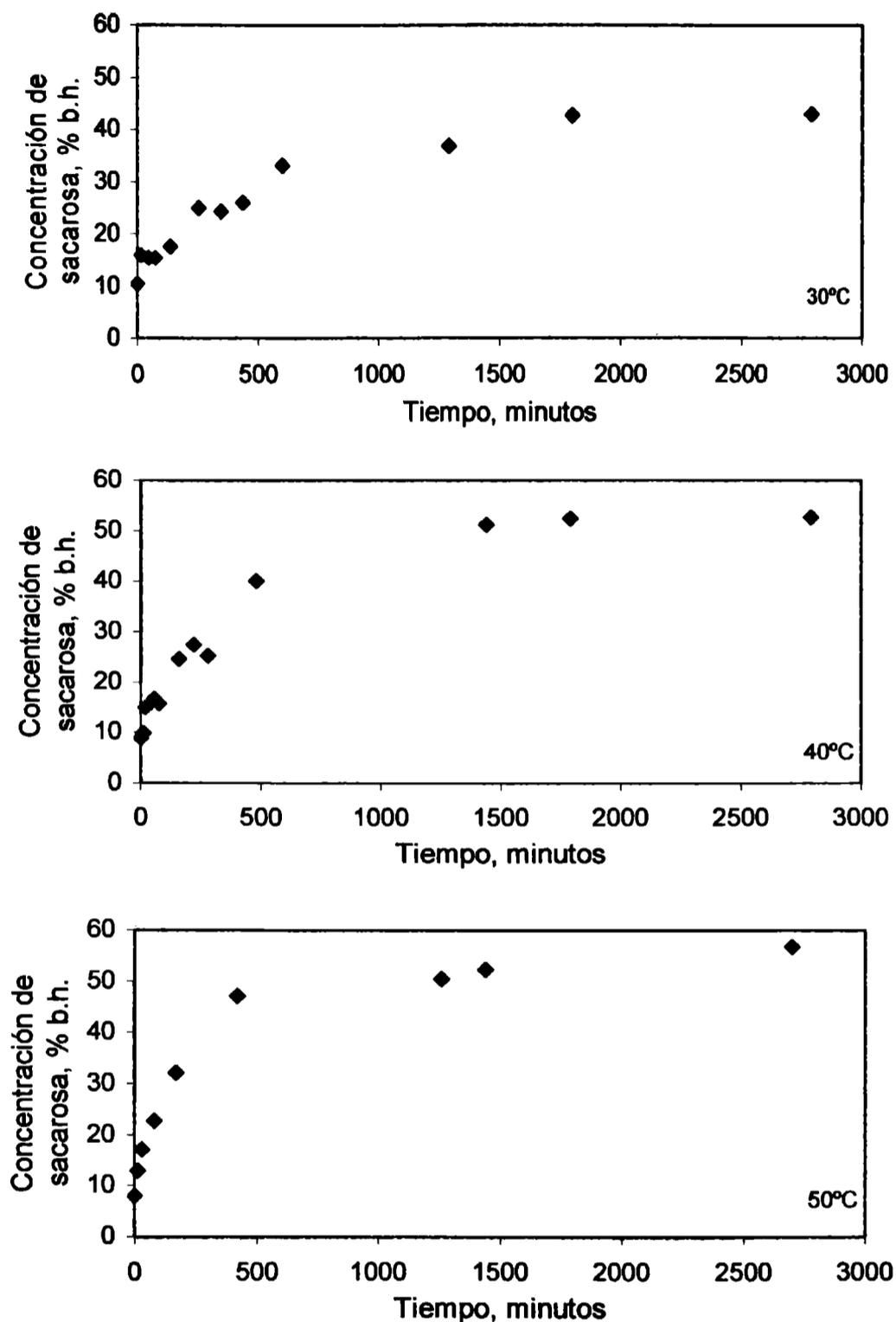
Si analizamos la variación de la velocidad de los procesos de deshidratación, se encuentra que la misma disminuye notoriamente durante la primera hora de proceso. Por otra parte, en estos primeros tiempos de tratamiento, la velocidad del proceso a 30 °C es marcadamente inferior que la velocidad del proceso a 40 y 50 °C (Figuras III.8). En las Figuras III.8 se observa, además, que la velocidad inicial de pérdida de agua a 40 y 50 °C no exhibe diferencias importantes. En cada figura, los diferentes símbolos representan ensayos experimentales independientes que se muestran a modo de manifestar la repetibilidad de los valores obtenidos, considerando que es una medida del grado de precisión de las mediciones.

Las medidas de la velocidad de pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de ananá señalan que la temperatura más apropiada para el proceso es 40 °C, ya que a 30 °C la velocidad de deshidratación es marcadamente inferior y a 50 °C los valores de velocidad son aproximadamente iguales que a 40 °C pero con las desventajas que involucran los procesos a mayor temperatura (mayor insumo energético, mayor pérdida de nutrientes, etc.).



**Figura III.8.** Relación entre la velocidad de deshidratación de medias rodajas de ananá y el tiempo de inmersión en solución de sacarosa a 30, 40 y 50 °C. Los diferentes símbolos en cada figura representan ensayos experimentales independientes

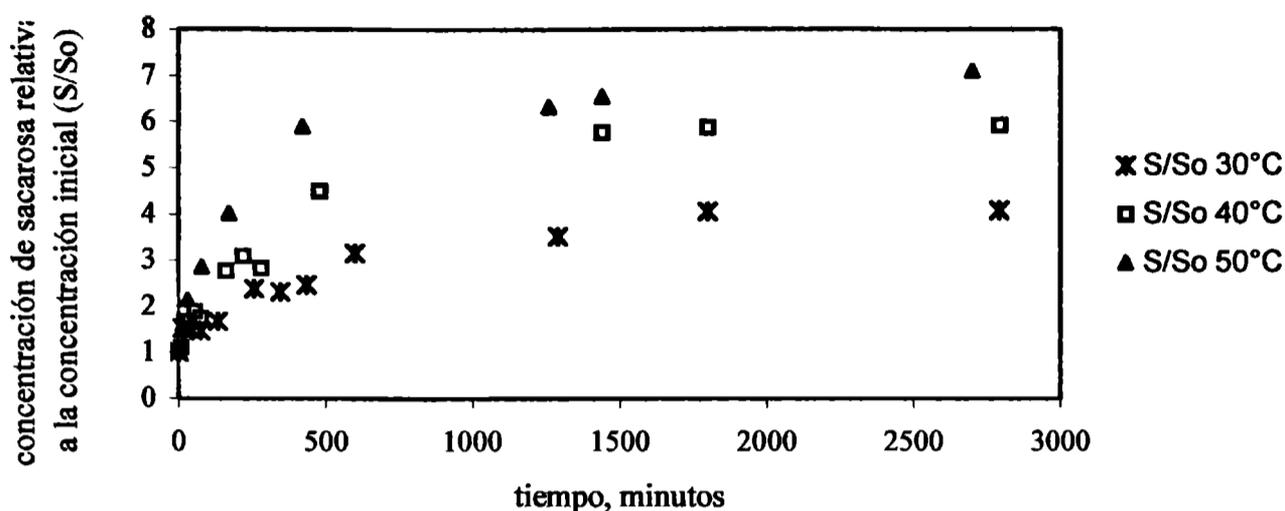
## 3.3.2 Resultados experimentales de ganancia de sacarosa



**Figura III.9.** Variación de la concentración de sacarosa con el tiempo, en un proceso de deshidratación osmótica de rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor en solución de sacarosa a 30, 40 y 50 °C, respectivamente.

Gráficos típicos del aumento en el contenido de sacarosa con el tiempo de inmersión se presentan en la Figura III.9. En estas gráficas se representan los valores experimentales del contenido de sacarosa en base húmeda, es decir en gramos de sacarosa por 100 gramos de producto, durante el proceso de deshidratación osmótica de rodajas de ananá a diferentes

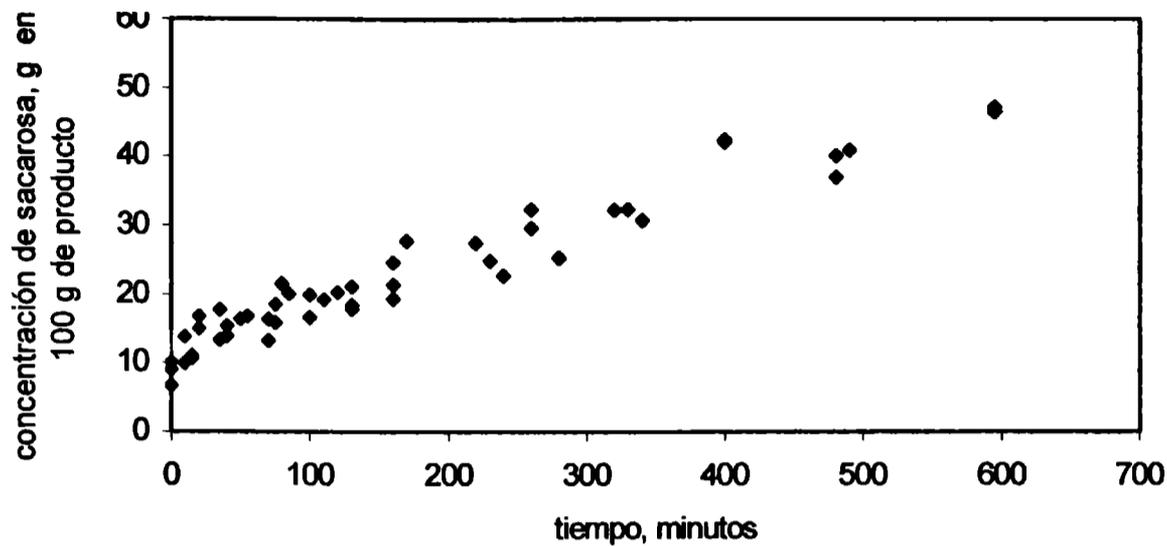
temperaturas. En la Figura III.10 se compara mejor el efecto de la temperatura sobre la ganancia de soluto. Aquí se utilizó una relación adimensional de la concentración, ya que las frutas tienen inicialmente diferente concentración de sacarosa.



**Figura III. 10.** Gráfica comparativa de las variaciones en el contenido de sacarosa durante procesos de deshidratación osmótica a diferentes temperaturas.

La técnica comúnmente aplicada para evaluar la ganancia de soluto durante los procesos de deshidratación osmótica se basa en el balance de masa y en la cuantificación del contenido de agua de las muestras (Lazarides et al., 1997; Sereno et al., 2001; Falade et al., 2007). En el presente trabajo, la valoración de la concentración de sacarosa en la fruta se realizó mediante cromatografía líquida, por lo cual la dispersión de los resultados puede ser un dato indicativo de la aplicabilidad del método. Dicha dispersión se visualiza en Figura III.11 donde se representan los datos experimentales de la concentración de sacarosa (gramos de sacarosa en 100 g de producto) obtenidos en seis experiencias individuales de deshidratación osmótica de rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor a 40 °C. En esta figura puede verse, además, que en seis horas de inmersión el sistema aún no llega al equilibrio. Al inicio del tratamiento osmótico, tanto la ganancia de azúcar como la pérdida de agua son procesos relativamente rápidos, como se muestra en las Figuras III.8 y III.12. Los cambios en las velocidades sugieren que la deshidratación osmótica de ananá en sacarosa es un proceso en dos etapas o estados: el primer estado dura un período de aproximadamente 60-90 minutos cuando la deshidratación se efectúa a 40-50 °C, en el cual la velocidad de transferencia de agua y de soluto es más alta pero disminuye progresivamente; y un

segundo período a partir de 100 minutos en el cual el flujo de masa es muy bajo y presenta pocos cambios.

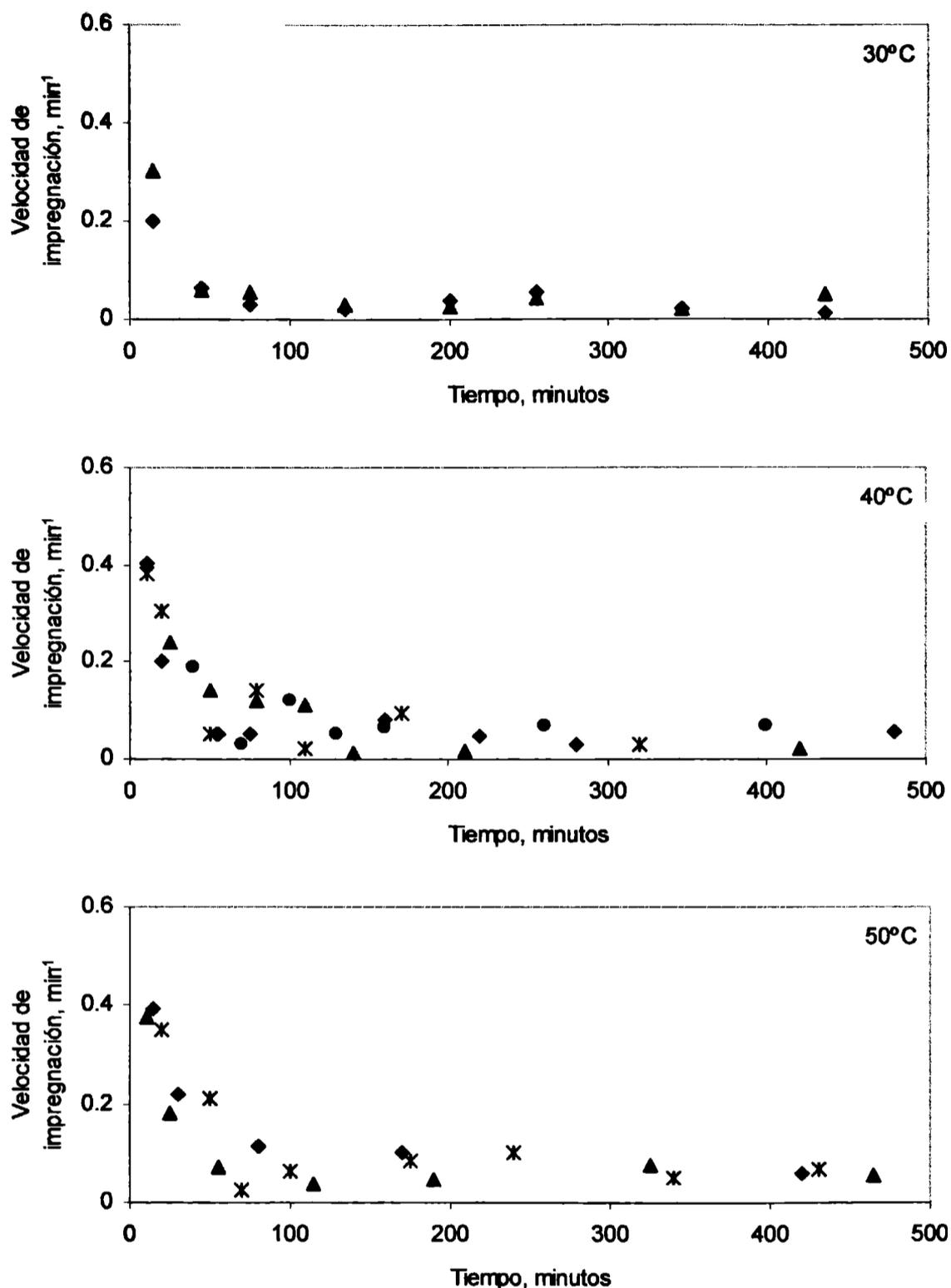


**Figura III.11.** Variación del contenido de sacarosa en seis procesos individuales de deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa a 40 °C.

En la Figura III.12 se puede observar que la velocidad de impregnación durante la primera hora de deshidratación osmótica a 30 °C es inferior que la respectiva a 40 y 50 °C, pero los valores de velocidad a estas últimas temperaturas no difieren entre sí. Cabe aclarar que los valores utilizados en la elaboración de los gráficos son valores medios de concentración de sacarosa en las rodajas de ananá.

A tiempos de inmersión mayores que 200 minutos, la velocidad media de ganancia de azúcar a 50 °C es aproximadamente un 40 % más alta que a 40 °C. No se observaron estas diferencias en los valores de velocidad de deshidratación (Figura III.8).

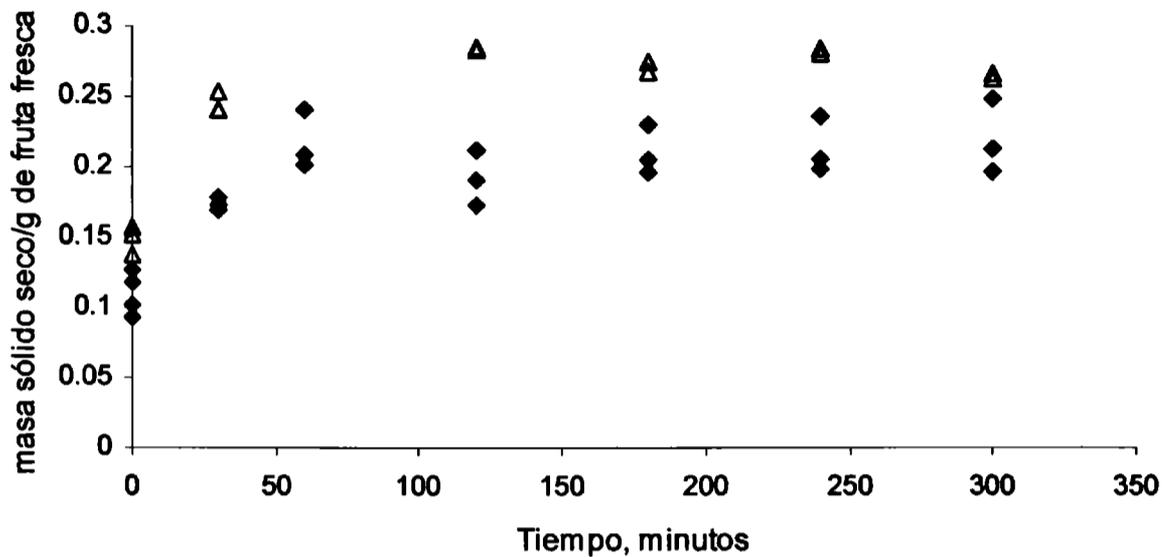
Estos resultados experimentales revelan que el contenido de azúcar en la fruta aumenta lentamente después de dos horas de impregnación, a partir de lo cual se plantea la posibilidad de que este aumento de concentración esté dada fundamentalmente por la pérdida de peso originada por la salida de agua del tejido. De ser así, el proceso de ganancia de sacarosa en ananá tendría dos etapas: una primera etapa de impregnación y una segunda etapa de concentración.



**Figura III. 12.** Velocidad de impregnación de medias rodajas de ananá en función del tiempo de inmersión en solución de sacarosa a 30, 40 y 50 °C. Los diferentes símbolos en cada figura representan ensayos experimentales independientes.

Para demostrar esta hipótesis se efectuó un análisis diferente de los datos: se evaluó la evolución del peso de sólido seco por gramo de fruta fresca. A tal fin fue necesario medir en la misma muestra la pérdida de agua y el peso seco, esto se realizó sobre tres muestras diferentes a cada tiempo, todas provenientes de una misma fruta. La masa seca de la fruta fresca se tomó de un promedio de cuatro muestras. Este análisis se efectuó sobre dos

ensayos independientes a 40 °C y 60 °Brix. Los resultados se presentan en la Figura III.13 e indican que luego de dos horas de proceso la fruta ya no “gana” soluto, aunque la deshidratación continúa.



**Figura III. 13.** Variación del contenido de sacarosa durante la deshidratación osmótica, evaluado como masa de sólido seco por gramo de fruta fresca. Los diferentes símbolos representan ensayos experimentales independientes.

### 3.3.3 Contenido de agua y de sacarosa en el equilibrio

El contenido de agua y la concentración de sacarosa de equilibrio se determinaron experimentalmente, evaluados al tiempo en que la velocidad de cambio de estos componentes (humedad y azúcar) tiende a cero. Se encontró que este punto se alcanza a las 30 h de inmersión aproximadamente; Beristain et al. (1990) presentan puntos de equilibrio en ananá a tiempos menores de las 6.5 horas. Los valores medios obtenidos a las tres temperaturas de trabajo se dan en la Tabla III.2, junto al desvío estándar correspondiente. Del análisis estadístico, se encontró que no existen diferencias significativas entre los valores medios del contenido de agua de equilibrio a las tres temperaturas de trabajo. Por el contrario, se encontró que los valores medios de la concentración de sacarosa de equilibrio son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). En otras palabras, estos resultados indican que el contenido de humedad de equilibrio es independiente de la temperatura mientras que el grado de impregnación aumenta con la temperatura del proceso. Estos resultados son concordantes con los reportados por Panagiotou et al. (1998) en un estudio de deshidratación osmótica de piezas de banana, manzana y kiwi en solución de sacarosa.

En el rango de temperaturas de trabajo (de 30 a 50 °C) la concentración media de equilibrio de sacarosa aumentó 1.2 veces. Las diferencias entre los resultados a 40 °C y 50 °C no son significativas.

**Tabla III. 2.** Humedad de equilibrio (gramos de agua en 100 g de material) y concentración de sacarosa de equilibrio (gramos de sacarosa en 100 g de material), calculados después de 30 horas de deshidratación osmótica en solución acuosa de sacarosa, con agitación.

Temperatura (°C)	Concentración de sacarosa de equilibrio ± ds	Contenido de humedad de equilibrio ± ds
30	45.12 ± 3.14	35.95 ± 0.07
40	53.0 ± 0.4	34.3 ± 2.50
50	54.3 ± 2.4	35.7 ± 2.28

\* ds: desvío estándar

### 3.4 Variación del espesor

La dependencia del factor de volumen ( $S_v$ ) con el contenido de humedad adimensional ( $W/W_0$ ) se presenta en la Figura III.14. Del estudio estadístico de estos datos se encontró que el modelo que mejor representa esta dependencia es:

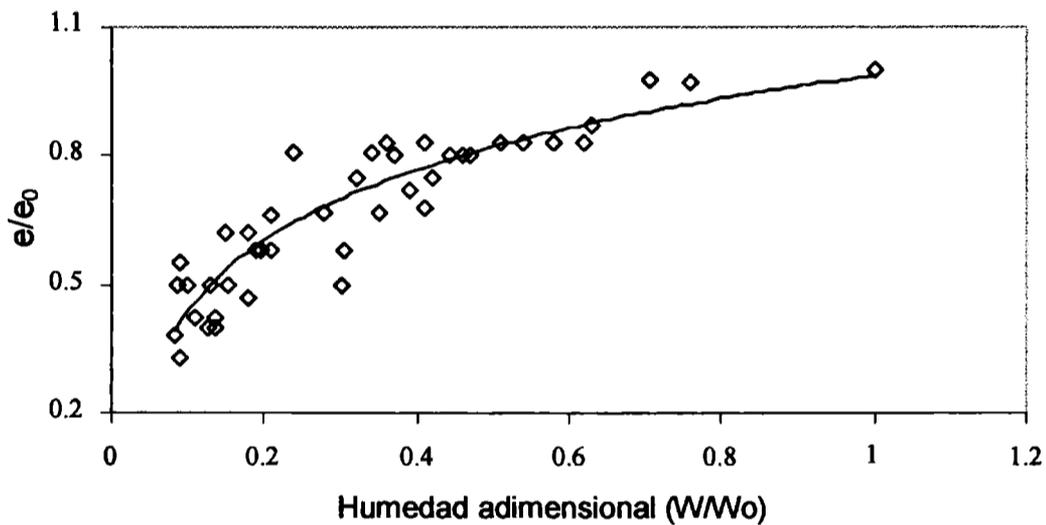
$$S_v = e/e_0 = 0.9868 + 0.2384 \cdot \ln(W/W_0), \quad p < 0.01, \quad (III.11)$$

El coeficiente de correlación fue de 0.9334, indicando una fuerte relación entre las variables.

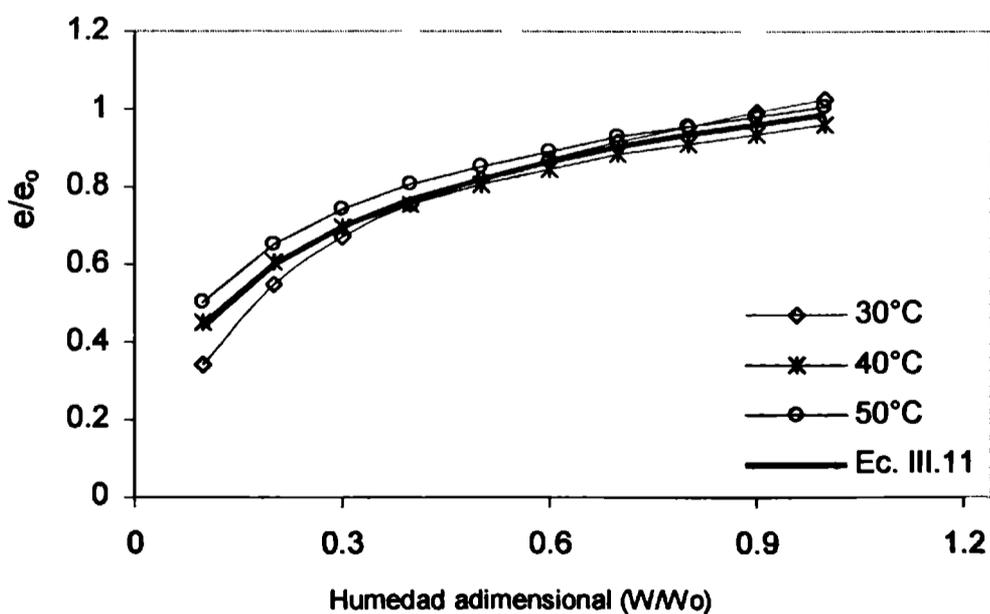
Si bien usualmente se considera la relación lineal entre  $S_v$  y ( $W/W_0$ ) en el secado y la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas (Lozano et al., 1983; Mavroudis et al., 1998; Achariyaviriya et al., 2000; Moreira & Sereno, 2003), los resultados obtenidos en este estudio están mejor representados por una función logarítmica.

La velocidad de variación del espesor fue individualmente estudiada a cada temperatura de proceso (30, 40 y 50 °C). El modelo logarítmico es el que muestra mejor ajuste a estos datos para cada temperatura. Posteriormente, se compararon los valores de pendiente y ordenada al origen a  $\ln(W/W_0)=0$  para las tres rectas resultantes. Se encontró que existe una importante superposición en los límites de confianza de las ordenadas al origen, indicando que no hay diferencias entre ellas. Lo mismo ocurrió con las pendientes a 40 y 50 °C, ya que los valores de las mismas fueron  $0.2215 \pm 0.02519$  y  $0.2183 \pm 0.01638$ ,

respectivamente. El valor de la pendiente a 30 °C fue  $0.2955 \pm 0.0140$ , estadísticamente diferente de los otros. Sin embargo, la pequeña diferencia entre los valores predichos con las tres ecuaciones individuales (una para cada temperatura, como se ve en la Figura III.15) y los valores predichos con la Ecuación III.11, fundamentan que la elección de un modelo de encogimiento independiente de la temperatura para la deshidratación osmótica de ananá entre 30 y 50 °C podría ser apropiada. Además, las diferencias entre los datos experimentales a diferentes temperaturas de proceso solamente son significativas a muy bajo contenido de agua, valores usualmente no alcanzados durante la deshidratación osmótica.



**Figura III. 14.** Variación de  $S_v$  de rodajas de ananá durante la deshidratación osmótica como una función de  $W/W_0$ . ( $\diamond$ ) Datos experimentales. (—) Variación Logarítmica (Ecuación III.11)



**Figura III. 15.** Valores de  $S_v$  predichos por modelos logarítmicos resultantes del análisis de regresión de los datos experimentales a tres temperaturas independientes: ( $\diamond$ ) 30 °C; ( $\ast$ ) 40 °C; ( $\circ$ ) 50 °C; (—) Ecuación III.11.

### 3.5 Coeficientes de difusión del agua y de la sacarosa

Por regresión no lineal de los datos experimentales a las Ecuaciones III.5 y III.6 se obtuvieron los valores de  $D_w$  y  $D_s$ , incorporando en la solución el encogimiento de las muestras en función del contenido de agua en las mismas. Los valores medios de los coeficientes de difusión del agua y del azúcar, obtenidos a diferentes temperaturas (30, 40 y 50 °C) se presentan en la Tabla III.3. Estos coeficientes presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los mismos a distintas temperaturas en el caso del  $D_w$ ; en el caso del  $D_s$  hay diferencias significativas entre los valores obtenidos a 40 y 50 °C, pero no así entre los valores obtenidos a 30 y 40 °C. Es preciso aclarar que el ajuste por regresión no lineal de las Ecuaciones III.5 y III.6 se realizó sobre datos experimentales resultantes de las primeras seis horas de deshidratación.

Los valores del error promedio porcentual del contenido de humedad estimados a partir del modelo (Ecuaciones III.5 y III.6) son 1.86 % a 30 °C, 3.77 % a 40 °C y 3.78 % a 50 °C. Los valores del error en la estimación de la concentración de sacarosa con dicho modelo son: 10.21 % a 30 °C, 8.57 % a 40 °C y 18.94 % a 50 °C. Estos valores representan la media de tres ensayos individuales a cada temperatura.

**Tabla III. 3.** Valores medios y desvío estándar del coeficiente de difusión del agua ( $D_w$ ) y del coeficiente de difusión de la sacarosa ( $D_s$ ) durante procesos de deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá, calculados a partir de las Ecuaciones III.5 y III.6.

Temperatura (°C)	$D_w \times 10^{11}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_s \times 10^{11}$ (m <sup>2</sup> /s)
30	2.22 ± 0.17	2.98 ± 0.50
40	3.77 ± 0.67	3.42 ± 0.55
50	6.03 ± 1.38	6.02 ± 2.55

A los efectos de comparar los valores obtenidos con los que aparecen en la bibliografía se calcularon los coeficientes de difusión considerando espesor constante, aplicando el primer término de la serie solución (método de la pendiente) y aplicando los primeros cinco términos de la serie. Estos modelos simplificados han sido ampliamente utilizados en el modelado de los procesos de secado (Sander et al., 1998; Karatas & Pinarh, 2001) y de deshidratación osmótica (Lazarides et al., 1997; Feng et al., 2000).

Análisis de regresión lineal y no lineal fueron utilizados para calcular los coeficientes de difusión aparente ( $D_w$  y  $D_s$ ) a partir del ajuste de los datos experimentales de cada ensayo a las Ecuaciones III.3 y III.4. De acuerdo a estos resultados, presentados en la Tabla III.4, los coeficientes de difusión obtenidos por el método de la pendiente no pueden ser considerados diferentes a aquellos obtenidos con los cinco primeros términos de la serie solución, de acuerdo al análisis estadístico (ANOVA). Por el contrario, los valores de los coeficientes obtenidos con el modelo de espesor variable (Ecuaciones III.5 y III.6) son estadísticamente diferentes a los previamente mencionados

Nuestros valores de  $D_w$  y  $D_s$  son del mismo orden de magnitud de aquellos encontrados en otras frutas y hortalizas, tales como manzanas (Lazarides et al., 1997), zanahorias (Rastogi & Raghavarao, 1998) y bananas (Rastogi et al., 1997). No obstante nuestros valores de  $D_w$  son algo menores que los publicados por Beristain et al. (1990) y por Rastogi & Niranjana (1998) en ananá.

**Tabla III. 4.** Valores medios y desvío estándar del coeficiente de difusión del agua ( $D_w$ ) y de la sacarosa ( $D_s$ ) del proceso de deshidratación osmótica de ananá, calculados con espesor constante.

	Temperatura (°C)	Coeficiente de difusión x 10 <sup>11</sup> (m <sup>2</sup> /s)	
		Primer término de la serie	Cinco términos de la serie
agua	30	5.80 ± 1.60	4.57 ± 0.52
	40	17.17 ± 2.83	10.78 ± 2.23
	50	22.22 ± 2.55	18.38 ± 4.67
sacarosa	30	7.68 ± 3.68	5.75 ± 0.88
	40	16.10 ± 4.18	10.00 ± 1.83
	50	21.83 ± 5.67	18.33 ± 6.63

Los valores del error promedio porcentual de la estimación del contenido de agua en la fruta, durante la deshidratación, aplicando los coeficientes que figuran en la Tabla III.4, fueron de 5.21 % a 30 °C, 7.77 % a 40 °C y 5.01 % a 50 °C con el método de la pendiente y 1.66 % a 30 °C, 5.26 % a 40°C y 3.93 % a 50 °C utilizando los cinco primeros términos de la serie solución.

Se encontró que los valores del error relativo porcentual en el cálculo de la concentración de sacarosa a partir del modelo de Fick son mayores que los obtenidos en el estudio de la pérdida de humedad. En general, el modelo predice valores por encima de los experimentales en los primeros tiempos de procesamiento, hasta aproximadamente los 400

minutos. Los valores del error promedio porcentual obtenidos con el método de la pendiente fueron de 13.16% a 30°C, 22.37% a 40°C y 22.64% a 50°C y con los cinco primeros términos de la serie fueron de 9.23, 12.97 y 14.05 % a 30, 40 y 50 °C, respectivamente.

### 3.6 Índice de Eficiencia del proceso de deshidratación osmótica

Un parámetro de eficiencia de la deshidratación puede ser la relación  $D_w/D_s$  (Lazarides et al., 1997) el cual, como es de esperar dada la variación de los coeficientes de difusión con la temperatura, aumenta con la temperatura al pasar ésta de 30 a 40 °C y permanece constante cuando al temperatura aumenta de 40 a 50 °C (Tabla III.5).

**Tabla III. 5.** Índice de eficiencia del tratamiento osmótico de medias rodajas de ananá de 0,6 cm de espesor a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	30	40	50
$D_w/D_s$	0.754	1.07	1.02

Lazarides et al. (1997) encontraron que estos índices prácticamente no varían con la temperatura en la deshidratación de rodajas de manzanas. Conclusiones análogas fueron publicadas por Rastogi & Raghavarao (1998) para deshidratación de zanahorias, donde se observa que los índices son independientes de la temperatura. Castro et al. (1998) y Saputra (2001) encontraron, en deshidratación de ananá en solución de sacarosa, que la pérdida de agua se ve favorecida con la temperatura mientras que la ganancia de sólidos no varía con la misma. Estos resultados son coincidentes con los aquí hallados en el rango de temperaturas entre 40 y 50 °C, aunque contradictorios si se analizan los resultados obtenidos en el rango de temperaturas 30-40 °C. Las diferencias podrían atribuirse a las diferentes variedades de ananá y rangos de temperatura de proceso.

### 3.7 Relación entre el contenido de agua y de sacarosa durante el proceso

La transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica es una combinación simultánea de pérdida de agua y ganancia de soluto (Hough et al., 1993; Rahman & Perera, 1996; Spiazzi & Mascheroni, 1997). Por esta razón, los datos experimentales de pérdida de agua y ganancia de sacarosa se analizaron en forma conjunta en esta etapa del trabajo.

La Figura III.16 muestra la evolución de la relación concentración de sacarosa versus contenido de agua en las muestras de ananá, durante el proceso de deshidratación osmótica en solución de sacarosa a tres temperaturas diferentes. En todos los casos los resultados ajustan a una función lineal en la forma generalizada de la Ecuación III.12, mostrando un excelente ajuste ( $p \leq 0,001$ ).

$$S = a + b W \tag{III.12}$$

donde:  $a$  y  $b$  son parámetros del modelo,  $S$  es el contenido medio de sacarosa en la media rodaja de ananá (g/100 g de fruta) y  $W$  es el contenido medio de agua ( g/100 g de fruta).

La Tabla III.6 muestra los valores medios de los parámetros  $a$  y  $b$ , resultantes del ajuste de los datos experimentales- contenido de agua y de sacarosa- a la función lineal (Ecuación III.12), para cada experiencia individual. El análisis estadístico (ANOVA) mostró que dichos parámetros son independientes de la temperatura.

**Tabla III. 6.** Resultados del ajuste de los datos experimentales, contenido de sacarosa y de agua, a la función lineal.

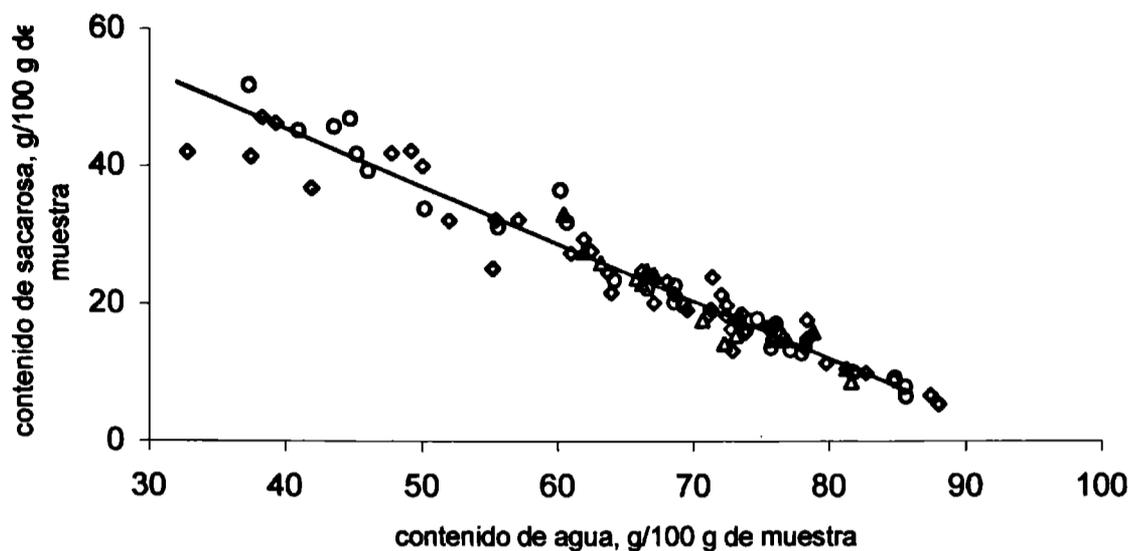
Temperatura °C	Ordenada al origen $\pm$ ds (a)	Pendiente $\pm$ ds (b)	Coefficiente de correlación
30	87.04 $\pm$ 3.479	-0.948 $\pm$ 0.0523	0.942
40	76.047 $\pm$ 8.231	-0.794 $\pm$ 0.1072	0.984
50	83.197 $\pm$ 9.820	-0.896 $\pm$ 0.1244	0.986

\* ds: desvío estándar

Estos resultados indican que la ganancia de soluto es una función del contenido de agua en la fruta y que esta relación es independiente de la temperatura en los primeros 600 minutos de deshidratación, en el rango de temperatura de 30 a 50 °C. Sin embargo la temperatura influye sobre la velocidad a la cual se alcanza esta relación  $S/W$ , como lo indica el índice de eficiencia del proceso (Tabla III.5) y los datos experimentales.

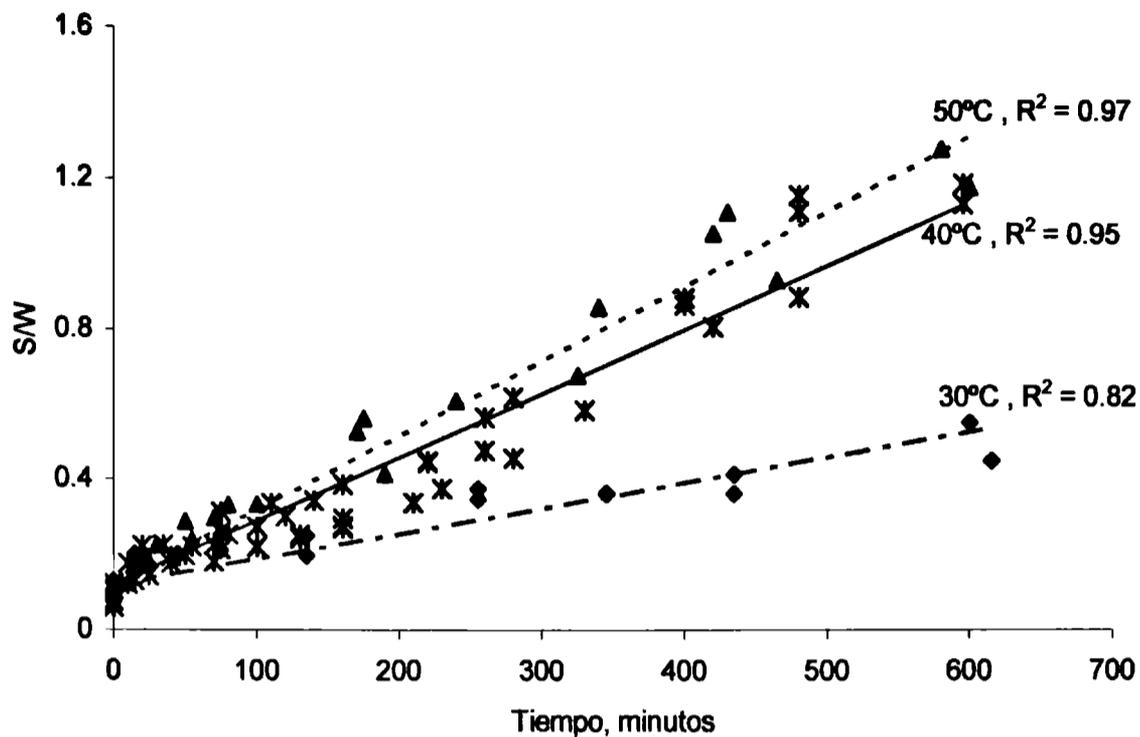
Posteriormente y en base a lo antes mencionado, se efectuó el ajuste de todos los datos experimentales al modelo lineal, Ecuación III.12, resultando la siguiente expresión

$$S = 79.051 - 0.8365 W \quad p < 0.001 \tag{III.13}$$



**Figura III. 16.** Datos experimentales de concentración de sacarosa versus el contenido de agua. La línea sólida representa los resultados predichos por el modelo lineal. (O) 30°C; (◇) 40°C; (△) 50°C.

El gráfico de los datos experimentales S/W versus el tiempo demuestra que esta relación cambia con la temperatura del proceso, con un comportamiento similar a 40 y 50 °C y algo diferente a 30 °C, como se puede observar en la Figura III.17. Estas observaciones están de acuerdo con los resultados del índice de eficiencia del proceso (Tabla III.5). La pendiente obtenida mediante análisis de regresión puede ser considerada como una medida de la velocidad de cambio en la relación contenido de sacarosa-contenido de agua en las muestras de ananá de 0.6 cm de espesor. Las pendientes se evaluaron en forma individual para cada experiencia de deshidratación osmótica; los valores medios de dichas pendientes son:  $0.000700 \pm 0.000078 \text{ min}^{-1}$ ;  $0.00185 \pm 0.00025 \text{ min}^{-1}$  y  $0.002007 \pm 0.00040 \text{ min}^{-1}$  a 30, 40 y 50 °C, respectivamente. La ordenada al origen se mantuvo en un valor constante de 0.12. En la Figura III.17 se presentan los resultados experimentales y las pendientes medias a cada temperatura, junto al respectivo coeficiente de regresión del modelo lineal.

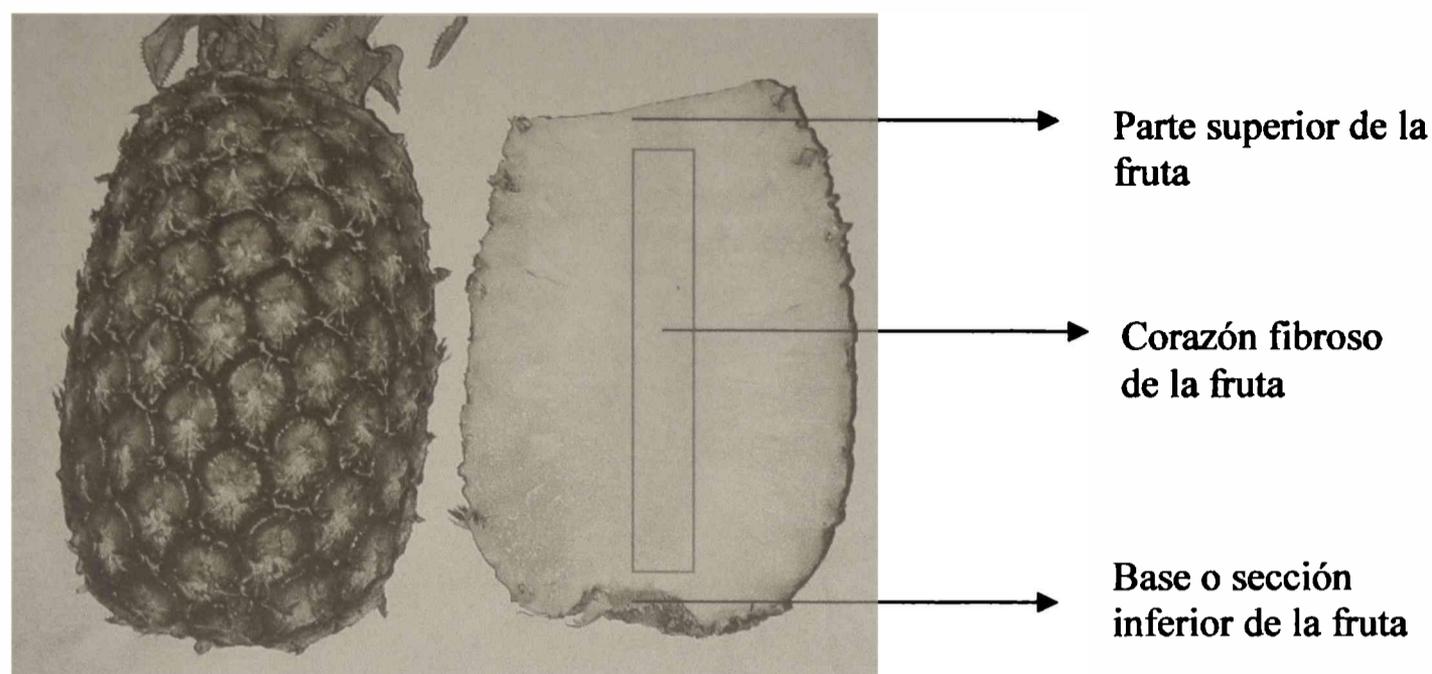


**Figura III. 17.** Relación del contenido de sacarosa al contenido de agua, S/W, durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá en jarabe de sacarosa (60 % w/w) a 30 °C (◆), 40 °C (\*) y 50 °C (▲).

### 3.8 Contenido de ácido L-ascórbico

#### 3.8.1 Variación del contenido de ácido L-ascórbico en la fruta fresca

Se estudió la variación del contenido de ácido L-ascórbico en la fruta fresca en función de la posición desde la base hacia la parte superior (en contacto con las hojas) de la fruta. Las frutas fueron peladas y seccionadas en rodajas de  $1.3 \pm 0.1$  cm de espesor; a estas porciones se les quitó el corazón fibroso con un sacabocado. Las rebanadas fueron clasificadas según la posición (el número 1 corresponde a la porción en contacto con las hojas, parte superior de la fruta). Se obtuvieron 8-9 rebanadas por fruta; de cada rebanada fueron tomados 3 muestras de aproximadamente 6 g para el análisis de la dispersión de resultados.



**Figura III. 18.** Fotografía de una fruta de ananá donde se señalan las regiones consideradas en la toma de muestra del material.

Estos ensayos se efectuaron sobre tres frutas diferentes. Los resultados muestran variación lineal del contenido de ácido ascórbico a lo largo de la fruta fresca:

$$C_{AA} = C_{max} - 0.01 * \psi \quad (III.14)$$

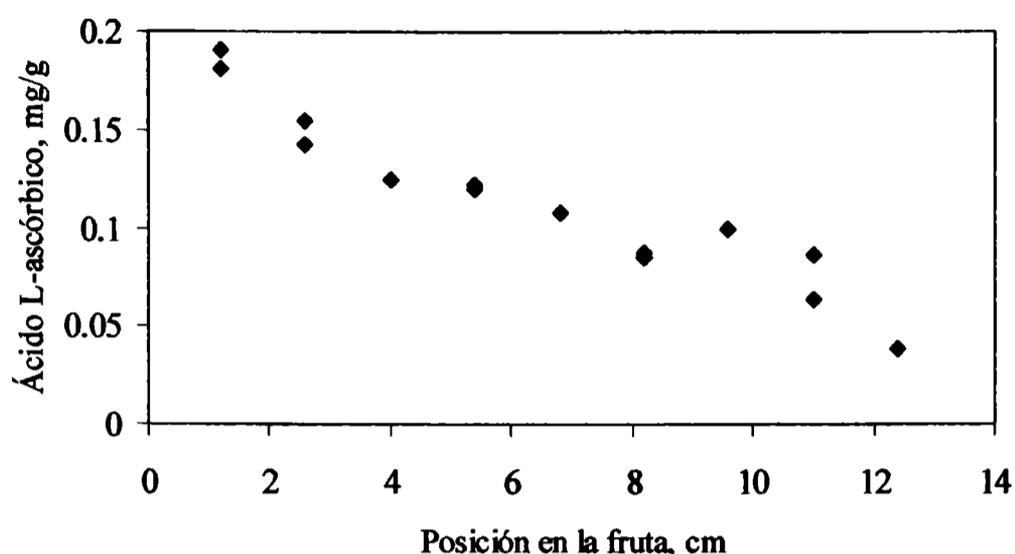
$C_{AA}$  = contenido medio de ácido L-ascórbico en la rodaja de ananá, mg/g

$C_{max}$  = máximo valor del contenido de ácido L-ascórbico en la fruta, mg/g

$\psi$  = posición en la fruta desde la parte superior, cm.

Resultados experimentales de la distribución del contenido de ácido L-ascórbico en la fruta fresca se muestra en la Figura III.19. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Miller & Hall (1953), quienes analizaron la distribución de algunos constituyentes del jugo de ananá seccionando la fruta en tres partes: superior, media y base; y encontraron que el valor de la concentración de ácido ascórbico en la parte superior es aproximadamente el doble del valor hallado en la base de la fruta. La naturaleza no homogénea de la fruta de ananá expone la necesidad de guardar cierta cautela en la selección de la fracción de fruta a emplear en los estudios y en la determinación de un valor fijo del contenido inicial de la vitamina C. Por otro lado, esto también explica la variabilidad de los resultados obtenidos durante los procesos. Similar situación de variabilidad de concentración de ácido ascórbico

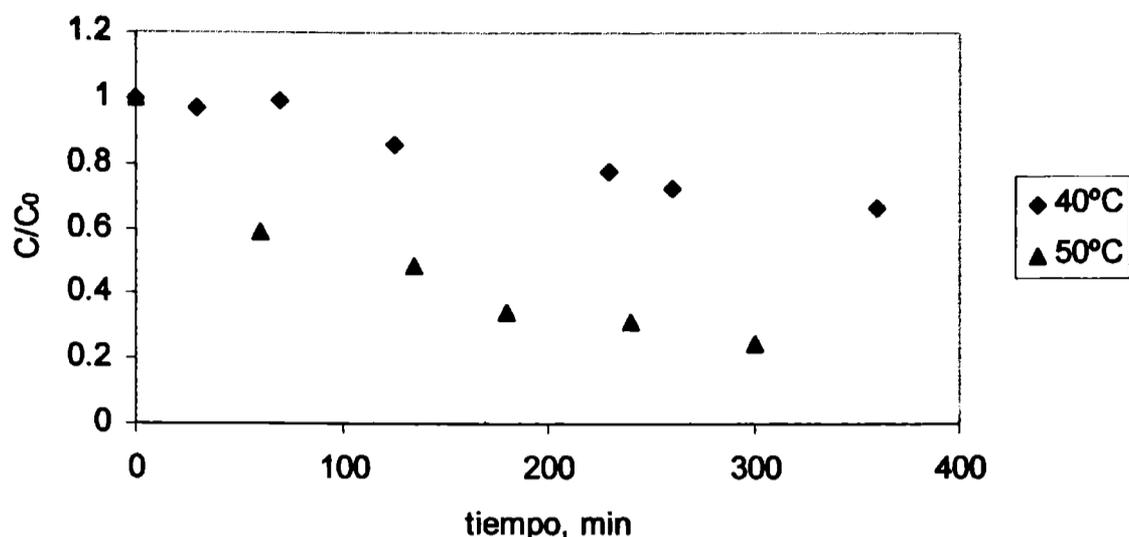
en un mismo lote de material fresco fue observada por Giannakourou & Taoukis (2003) en garbanzos, arvejas, espinaca y okra.



**Figura III. 19.** Contenido de ácido L-ascórbico (mg/g) en función a la posición de la rodaja dentro de la fruta fresca (distancia desde la parte superior).

### 3.8.2 Variación del ácido L-ascórbico durante la deshidratación osmótica

Los resultados experimentales indicaron una clara influencia de la temperatura sobre la degradación del ácido ascórbico (AA) en la fruta durante la DO en solución de sacarosa a 60 °Brix. La concentración se midió en mg de vitamina por 100 gramos de fruta fresca. Los valores de contenido de ácido ascórbico se representan relativos al contenido del mismo en la fruta fresca,  $C/C_0$ . En la Figura III.20 se muestra la retención de ácido ascórbico en ananá en función al tiempo de proceso, durante la deshidratación osmótica a 40 y 50 °C. Para un dado valor de tiempo de tratamiento osmótico, se observa claramente una mayor retención del AA durante el tratamiento a 40 °C.



**Figura III. 20.** Variación del contenido de ácido ascórbico en ananá durante la deshidratación osmótica a 40 y 50 °C.

Un incremento en la temperatura favorece la velocidad del proceso de deshidratación, pero simultáneamente se incrementa la velocidad de degradación del AA. El tiempo requerido para que el contenido de humedad descienda al 50 % y al 30 % del valor inicial y la respectiva retención de ácido ascórbico, a cada temperatura, se muestran en la Tabla III.7. Cada valor es el resultado de la media de tres ensayos y se presentan junto al desvío estándar respectivo. Se observa que el tiempo necesario para alcanzar determinado valor de  $W/W_0$  es levemente inferior a 50 °C que a 40 °C, sin embargo la retención de ácido ascórbico es considerablemente mayor a 40 °C.

**Tabla III. 7.** Retención de ácido ascórbico (AA) en medias rodajas de ananá, cuando el contenido de agua alcanza el 50 % y el 30 % del valor inicial

Temperatura (°C)	50 % de la humedad inicial		30 % de la humedad inicial	
	Tiempo (min) ± ds	% de retención de AA ± ds	Tiempo (min) ± ds	% de retención de AA ± ds
40	40 ± 8	96 ± 2	110 ± 10	88 ± 2
50	35 ± 3	80 ± 5	100 ± 7	55 ± 3

Las pérdidas de ácido ascórbico durante el tratamiento osmótico pueden deberse básicamente a dos fenómenos: migración hacia la solución osmótica y degradación por reacción química (Vial et al., 1991). Los resultados experimentales indican que la cinética de deshidratación es poco afectada por la temperatura en el rango de 40-50 °C y que se registra más del 50 % de pérdida de agua durante la primera hora de proceso osmótico, en

tanto que la disminución del contenido de ácido ascórbico en la fruta es del 3 al 20 %. Por otra parte, no se observa una notable caída en la concentración de ácido ascórbico durante la primera hora de tratamiento respecto del restante período, como ocurre con la pérdida de agua, y la retención del nutriente es fuertemente afectada por la temperatura. En base a lo antes expuesto, se puede inferir que la mayor pérdida de AA se debió a degradación por reacción química.

Estos resultados están de acuerdo con los publicados por Ade-Omowaye et al. (2002), al estudiar la pérdida de vitamina C durante la deshidratación osmótica de paprika a diferentes temperaturas, encontrando que la reducción del porcentaje del nutriente fue desde un 20 % hasta el 4 % en función de la temperatura del proceso de DO (25 a 55 °C), cuando la pérdida de agua fue de aproximadamente el 50 %. Erle & Schubert (2001) analizaron la retención de vitamina C durante la deshidratación de frutillas y manzanas a 20 °C en solución de sacarosa de 60 °Brix y encontraron que al cabo de 20 h de tratamiento las frutas conservaban más del 90 % del contenido inicial del nutriente, comparable a la retención observada durante el almacenamiento a 20 °C.

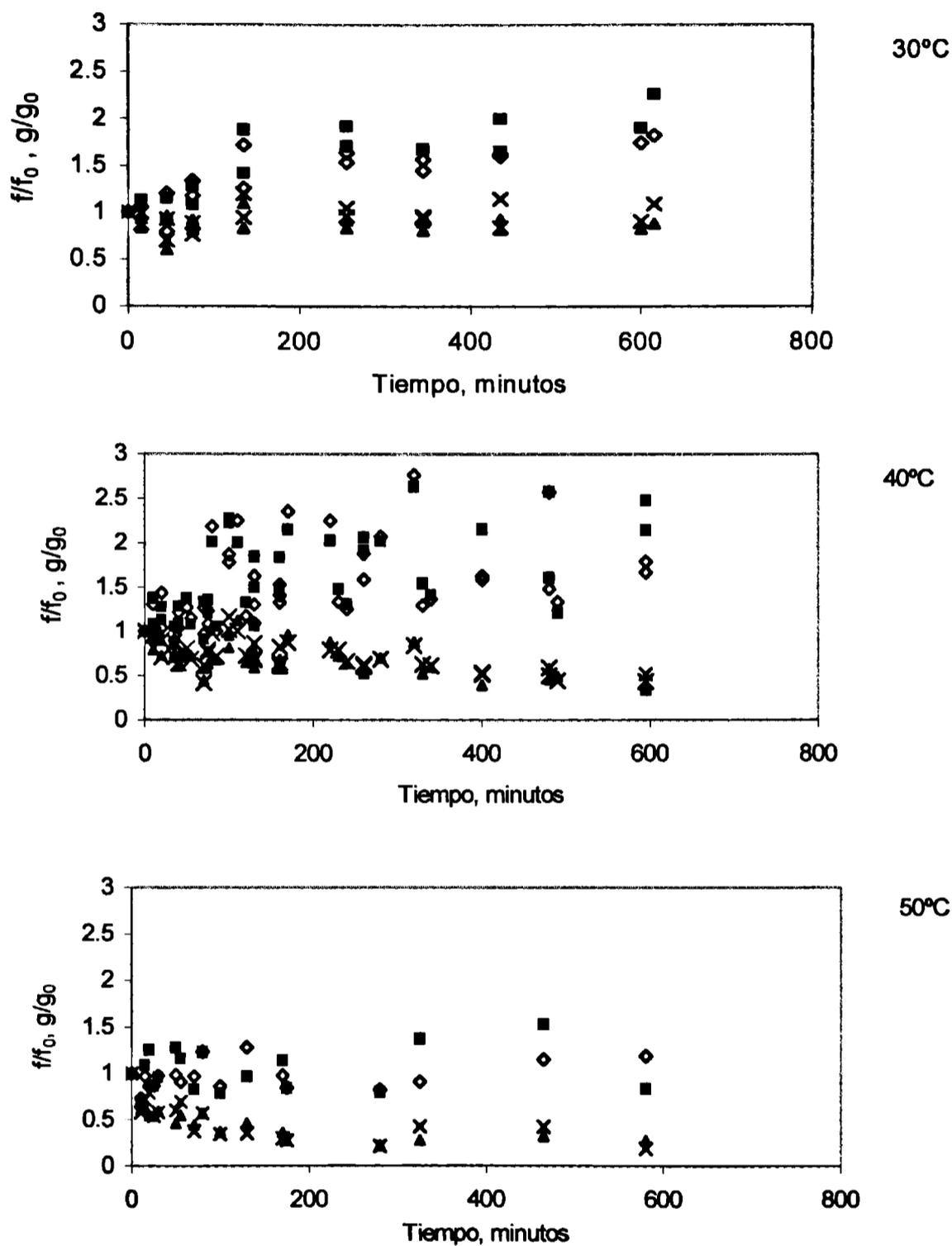
### **3.9 Concentración de glucosa y fructosa durante la deshidratación osmótica**

Durante la deshidratación osmótica el flujo de agua que sale de la fruta arrastra consigo varios tipos de solutos hidrosolubles (vitaminas, minerales, azúcares, etc.) (Torreggiani, 1993; Bolin & Huxsoll, 1993). El ananá contiene sacarosa, fructosa y glucosa en concentraciones apreciables y la combinación de los tres azúcares, junto a ácidos y otros compuestos, son los responsables del sabor característico de esta fruta.

En esta etapa del trabajo se analizó el contenido de glucosa y fructosa, presentes en forma natural en la fruta, durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá en solución hipertónica de sacarosa a tres temperaturas (30, 40 y 50 °C).

Resultados experimentales del contenido de glucosa y fructosa durante el proceso de deshidratación osmótica de rodajas de ananá a diferentes temperaturas se presentan también en la Figura III.21. Las concentraciones están expresadas de dos maneras: como el contenido de glucosa y fructosa en base húmeda, es decir en gramos de azúcar por 100 gramos de producto y como el contenido de glucosa y fructosa en base seca, es decir en gramos de azúcar por 100 gramos de producto seco. Se utilizó una expresión adimensional

de la concentración (concentración/concentración inicial), ya que no todas las frutas tienen inicialmente la misma concentración de azúcares.



**Figura III. 21.** Contenido de glucosa y fructosa durante la DO de rodajas de ananá en sacarosa a tres temperaturas, expresado como concentración relativa a la inicial.  $\diamond$   $f/f_0$  (bh);  $\blacksquare$   $g/g_0$  (bh);  $\blacktriangle$   $f/f_0$  (bs);  $\times$   $g/g_0$  (bs)

Estos datos experimentales muestran comportamiento similar a 30 y 40 °C: aumento del contenido de glucosa y fructosa en base húmeda debido a que la pérdida de agua genera un efecto de concentración de los componentes, y disminución de dicho contenido cuando las

concentraciones se expresan en base seca, ya que la impregnación de la fruta con el soluto (sacarosa) genera un aumento en el peso de los sólidos. De estos resultados se puede inferir que la concentración de glucosa y fructosa durante el proceso de deshidratación a 30 y 40 °C prácticamente no varía durante las primeras seis horas de procesamiento.

Los resultados obtenidos a 50 °C son algo diferentes: la concentración de glucosa y fructosa expresada en base húmeda se mantiene prácticamente constante, aún cuando el contenido de humedad ha disminuido al 14 % del contenido original. Esta pérdida neta de glucosa y fructosa, más notoria para la fructosa, puede deberse al arrastre de los mismos por la corriente de agua durante el proceso de deshidratación (lixiviado), puesto que un aumento en la temperatura de trabajo favorece la solubilidad y la difusión de estos azúcares en agua. Estos últimos resultados coinciden con los hallados por Bolin & Huxsoll (1993) en un estudio de deshidratación osmótica de peras en solución de sacarosa a 60 °C, donde encontraron disminución en el contenido de fructosa. Saurel et al. (1994) encontraron que el aumento de la temperatura de deshidratación favorece la disminución del contenido de fructosa en manzanas.

**Tabla III. 8.** Resultados del ajuste mediante regresión lineal del contenido de fructosa y de glucosa (gramos de azúcar en 100 g de producto).

Temperatura, °C	Ecuación de regresión	Significancia del ajuste
30 °C	$F/F_0(bh) = 2.15 - 0.003 W$	$p < 0.01$
	$G/G_0(bh) = 2.55 - 0.004 W$	$p < 0.01$
40 °C	$F/F_0(bh) = 1.93 - 0.002 W$	$p < 0.01$
	$G/G_0(bh) = 2.13 - 0.0022 W$	$p < 0.01$
50 °C	$F/F_0(bh) = 1.02 - 0.00016 W$	$p > 0.1^*$
	$G/G_0(bh) = 1.09 - 0.00021 W$	$p > 0.1^*$

W= humedad de la fruta, en gramos de agua por 100 grs de sólido seco.

\* $p > 0.1$  indica que la concentración no es función de la humedad. En este caso, que no varía durante la deshidratación a 50 °C

Del análisis estadístico de estos resultados se encontró que existe mejor correlación de los valores del contenido de azúcares con el contenido de humedad que con el tiempo de procesamiento. Este análisis también muestra comportamiento similar a 30 y 40 °C, mientras que a 50 °C todo indica una disminución en el contenido de glucosa y fructosa puesto que los valores del contenido de estos azúcares referidos a 100 g de producto se

mantienen constantes independientemente del contenido de humedad. Los resultados de la regresión se presentan en la Tabla III.8.

Otro resultado que hay que destacar es que ambos azúcares (glucosa y fructosa) se comportan de modo similar durante el procesamiento, lo cual difiere con los resultados encontrados en peras por Bolin and Huxsoll (1993) donde la concentración de fructosa disminuye durante el proceso, mientras que la de glucosa aumenta.

### **3.10 Hidrólisis de sacarosa durante la deshidratación osmótica del ananá**

Los resultados obtenidos muestran que la concentración de glucosa y fructosa durante el proceso de deshidratación a 30 y 40 °C prácticamente no varían durante las primeras seis horas de procesamiento. El fenómeno de hidrólisis de sacarosa al incorporarse a la fruta puede influenciar en la cantidad de azúcares reductores cuantificados durante el proceso. Para confirmar que los valores obtenidos del contenido de estos azúcares corresponden a la composición de glucosa y fructosa de la fruta natural y no al resultado de la hidrólisis de la sacarosa que penetra en la misma durante este proceso, se realizó una prueba de hidrólisis del soluto (sacarosa) en jugo de ananá, en un intento de simular las condiciones que se tienen en el interior de la fruta. Se trabajó sobre dos frutas diferentes, en cada una de ellas en dos condiciones de extracción.

*Extracto 1:* se dejó escurrir el líquido de la fruta, simulando de este modo los líquidos contenidos en los espacios extracelulares.

*Extracto 2:* se trituró la fruta en mortero, con el objetivo de extraer también compuestos del interior de las células.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla III.9.

De estos resultados se extraen las siguientes conclusiones:

- mediante este procedimiento no se observan diferencias significativas en las concentraciones de los jugos obtenidos en las dos formas de extracción (en el jugo natural)
- las concentraciones de glucosa, fructosa y sacarosa se mantienen prácticamente constantes durante los primeros 330 minutos a 45 °C. Las diferencias encontradas están en el orden del error experimental (dispersión de los resultados)
- a los 1200 minutos de tratamiento térmico se observa un aumento en la concentración de glucosa y fructosa debido a la hidrólisis ácida de la sacarosa.

**Tabla III. 9.** Concentración de fructosa, glucosa y sacarosa (gramos en 100 ml) en jugo de ananá, en función del tiempo de almacenamiento a 45 °C.

**Fructosa**

Tiempo	Fruta 1		Fruta 2	
	Extracto 1	Extracto 2	Extracto 1	Extracto 2
0	1.71 ± 0.12	1.47 ± 0.33	1.44 ± 0.11	1.42 ± 0.32
75	1.71 ± 0.02	1.62 ± 0.05	1.55 ± 0.07	1.43 ± 0.05
210	1.69 ± 0.10	1.64 ± 0.08	1.51 ± 0.09	1.34 ± 0.07
330	1.77 ± 0.14	1.63 ± 0.09	1.73 ± 0.14	1.55 ± 0.09
1200	2.04 ± 0.13	1.91 ± 0.17	1.82 ± 0.11	1.96 ± 0.11
Jugo natural	1.49 ± 0.07	1.49 ± 0.15	1.38 ± 0.06	1.25 ± 0.11

**Glucosa**

Tiempo	Fruta 1		Fruta 2	
	Extracto 1	Extracto 2	Extracto 1	Extracto 2
0	1.22 ± 0.09	1.02 ± 0.18	1.00 ± 0.07	0.80 ± 0.13
75	1.36 ± 0.22	1.13 ± 0.19	1.16 ± 0.19	0.82 ± 0.13
210	1.40 ± 0.10	1.23 ± 0.06	1.09 ± 0.06	0.85 ± 0.15
330	1.40 ± 0.28	1.27 ± 0.29	1.12 ± 0.11	0.90 ± 0.05
1200	1.71 ± 0.21	1.55 ± 0.25	1.59 ± 0.15	1.52 ± 0.10
Jugo natural	1.09 ± 0.14	1.01 ± 0.19	1.00 ± 0.12	0.79 ± 0.14

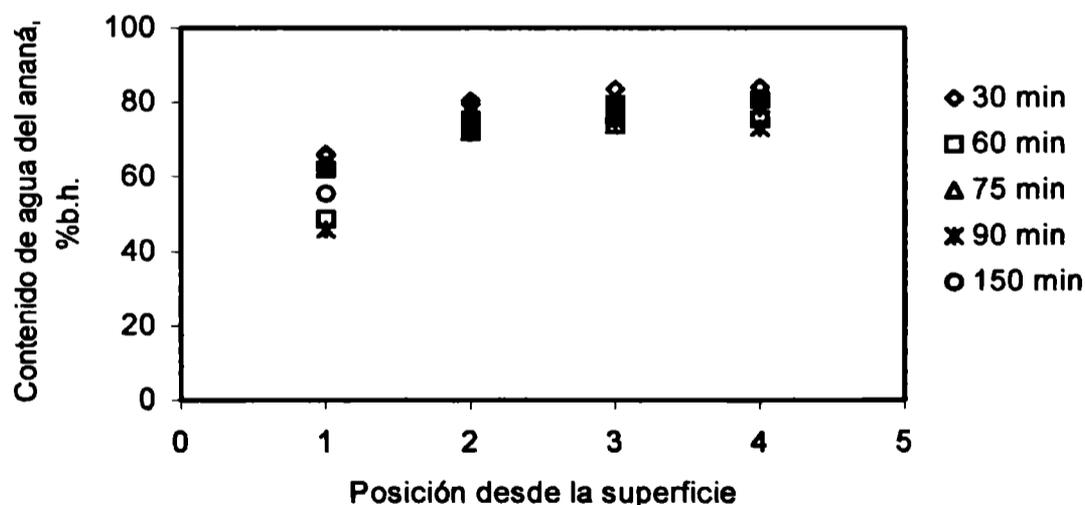
**Sacarosa**

Tiempo	Fruta 1		Fruta 2	
	Extracto 1	Extracto 2	Extracto 1	Extracto 2
0	9.08 ± 1.36	7.77 ± 0.64	8.81 ± 1.32	9.27 ± 0.76
75	9.08 ± 0.34	8.45 ± 0.19	9.06 ± 0.34	9.35 ± 0.21
210	9.25 ± 0.37	8.58 ± 0.48	8.87 ± 0.36	8.80 ± 0.49
330	8.87 ± 0.34	8.29 ± 0.99	9.23 ± 0.35	9.19 ± 1.10
1200	8.57 ± 0.49	7.91 ± 0.49	8.45 ± 0.48	9.75 ± 0.60
Jugo natural	6.13 ± 0.12	5.93 ± 0.18	6.62 ± 0.13	6.84 ± 0.20

### 3.11 Perfil de concentración de humedad, sacarosa, fructosa y glucosa

Se trabajó con medias rodajas de ananá de 10 mm de espesor, deshidratándolas en solución de sacarosa al 60 % en peso a 40 °C y con agitación. A diferentes tiempos se extrajo una muestra de fruta y se seccionó la misma cortándola manualmente en finas lonjas de 1 mm de espesor (son las secciones analizadas). De esta manera se determinó el perfil de concentraciones de agua, sacarosa, fructosa y glucosa en función del tiempo de tratamiento y de la posición desde la superficie.

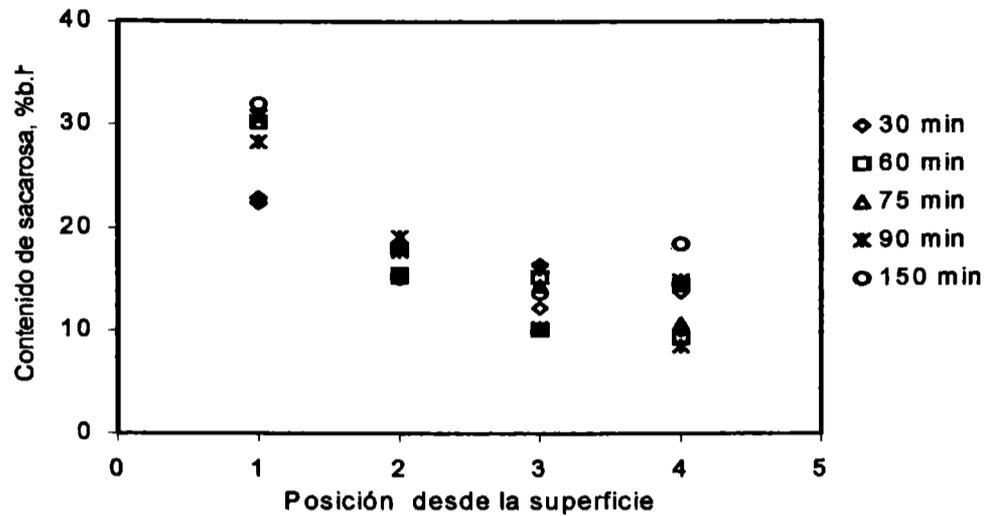
La Figura III.22 muestra el contenido de agua en función del tiempo y de la posición desde la superficie en contacto con la solución hipertónica, de dos experiencias de deshidratación osmótica de ananá a 40 °C. La Figura III.23 representa la concentración de sacarosa en la media rodaja de ananá en función de la posición desde la superficie y a distintos tiempos. Para los tiempos de deshidratación estudiados (30, 60, 75, 90 y 150 minutos) el contenido de agua y de sacarosa en el interior de la fruta permanece prácticamente inalterado. Estos resultados coinciden con los reportados por Marcotte & Le Maguer (1992) en papas y por Salvatori et al. (1998) en manzanas, donde se muestra que los cambios de composición (humedad y azúcar) más relevantes se producen en una distancia de aproximadamente 2 mm desde el borde.



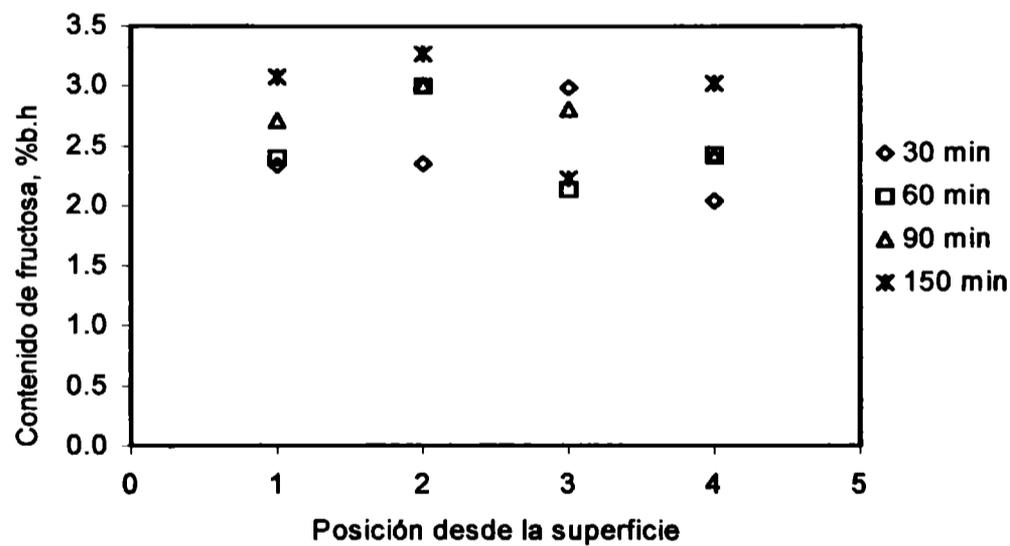
**Figura III. 22.** Contenido de agua en la rodaja de ananá como una función de la distancia desde la superficie de la fruta en contacto con solución de sacarosa a 40 °C.

El contenido inicial de glucosa y fructosa fue diferente en las dos frutas analizadas: 1.6 y 2.35% b.h. de glucosa y 2.04 y 2.5% b.h. de fructosa. La Figura III.24 muestra la concentración de fructosa en función del tiempo y de la posición. Las posiciones a través de

la placa indican secciones de 0.1 cm de espesor cada una, contando desde la superficie. Los resultados señalan que las concentraciones de glucosa y fructosa permanecen constantes en función del espesor durante el tiempo de deshidratación (150 minutos).



**Figura III. 23.** Contenido de sacarosa en la placa como una función de la distancia desde la superficie de la fruta en contacto con solución de sacarosa a 40 °C.



**Figura III. 24.** Contenido de fructosa en la placa como una función de la distancia desde la superficie de la fruta en contacto con solución de sacarosa a 40 °C

Los resultados del perfil de concentración de glucosa, fructosa, sacarosa y humedad indican que:

- solo existe perfil de humedad y sacarosa en los primeros dos milímetros de espesor desde la superficie en contacto con la solución hipertónica
- la forma del perfil no varía con el tiempo, para los tiempos en estudio (de 30 a 150 minutos) y a 40 °C

- las concentraciones de glucosa y fructosa permanecen constantes en función de la distancia desde el borde y del tiempo.

### 3.12 Sólidos solubles, pH y acidez titulable

Estos parámetros se cuantificaron durante los procesos de deshidratación osmótica a 40 °C, por considerarse esta temperatura la condición más conveniente entre las ensayadas puesto que presenta la mínima pérdida de vitamina C, con apropiados valores de los coeficientes cinéticos de deshidratación.

Los valores de la Tabla III.10 indican que el pH no varía durante el proceso, que la acidez total (g de ácido/100g fruta) sufre un pequeño aumento en el transcurso del proceso de deshidratación osmótica.

**Tabla III. 10.** Valores medios de sólidos solubles, pH y acidez total en rodajas de ananá durante la deshidratación osmótica en solución de sacarosa de 60 °Brix y 40 °C

Parámetros	Tiempo (minutos)						
	0	30	60	120	180	240	300
pH	3.43	3.44	3.53	3.46	3.47	3.55	3.45
Acidez total (g de ácido cítrico/100 g de producto)	0.59	0.54	0.70	0.61	0.87	0.86	0.85
Sólidos solubles (°Brix)	12.53	21.00	26.50	31.83	37.53	39.50	41.17
Sólidos solubles/acidez total	21.24	38.74	37.85	52.46	43.31	45.93	48.24

El nivel de sólidos solubles en ananá a tiempo cero corresponde a la fruta fresca (sin tratamiento osmótico). Los valores de sólidos solubles en la fruta se incrementan durante el tratamiento debido a la impregnación y deshidratación originadas por el proceso osmótico. La relación °Brix/acidez al final del proceso presenta un valor de aproximadamente el doble del evaluado en la fruta fresca, debido a la remoción de agua de modo simultáneo al ingreso de sólidos. Este parámetro presenta especial importancia en aquellas regiones en que el ananá es clasificado por los consumidores como “fruto muy ácido”, valoración sensorial que podría ser minimizada a través de un proceso de deshidratación osmótica controlada.

### 3.13 Color

La transparencia y el color de la fruta pueden cambiar considerablemente durante la deshidratación osmótica. Las causas de estos cambios pueden ser físicas y/o químicas (Chiralt & Talens, 2005). Puede ocurrir degradación de los pigmentos de la fruta y desarrollo de pardeamiento durante el proceso. Por otra parte, la pérdida de agua implica un incremento en la concentración de los pigmentos.

La pérdida de agua también puede ocasionar un incremento en el índice de refracción de la fase líquida del tejido vegetal ocasionando modificación en la reflexión superficial. Asimismo, durante la deshidratación osmótica ocurre algún intercambio de fase gaseosa (aire ocluido) por el líquido exterior en contacto con la superficie de las muestras (poros), debido a mecanismos hidrodinámicos, afectando el índice de refracción del tejido y, consecuentemente, su transparencia. De esta manera, el intercambio gas-líquido puede provocar que las frutas luego de un proceso de deshidratación osmótica se presenten más translúcidas, afectando de esta forma su color y apariencia (Talens et al., 2002).

En la Figura III.25 se pone en evidencia que el proceso de deshidratación osmótica con sacarosa genera cambios en el color global del ananá (Ecuación III.10) y que los cambios de apariencia más importantes ocurren en la primera hora de inmersión. La temperatura del proceso no afecta a dichos cambios, en el rango de 40-50 °C. Estos resultados concuerdan con los hallados por Tan et al. (2001) durante la deshidratación de ananá a temperatura ambiente, donde a los 300 minutos de tratamiento se registró un valor de  $\Delta E = 5$ .

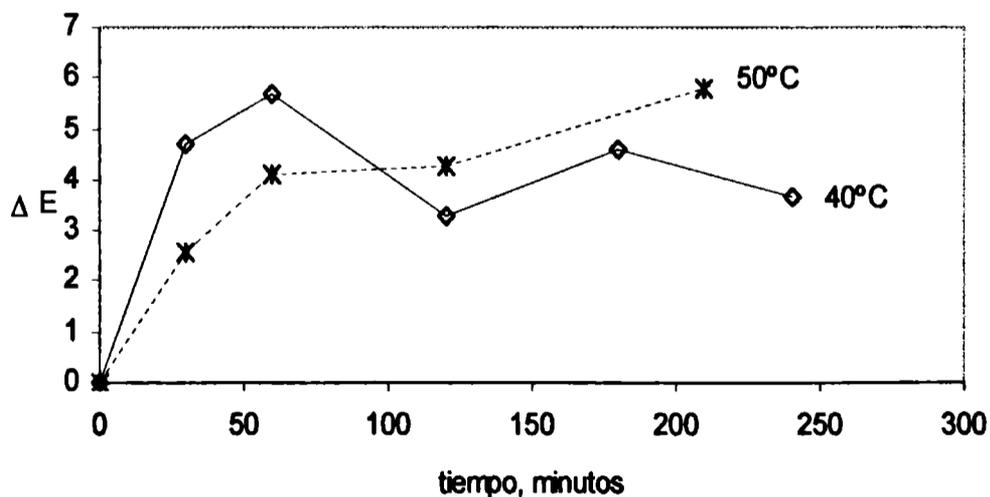


Figura III. 25. Comparación del cambio en el color global de ananá deshidratado a 40 °C y a 50 °C

De las causas de cambios en el color antes mencionadas, la alteración de los pigmentos de la fruta o pardeamiento suele ser la más perjudicial para la aceptación del producto ya que implica cambios en los valores del tono (*hue*) característico de la fruta. Estos efectos se podrían minimizar procesando la fruta a baja temperatura y con azúcares que ejercen un efecto protector sobre algunos pigmentos vegetales tales como la clorofila y las antocianinas.

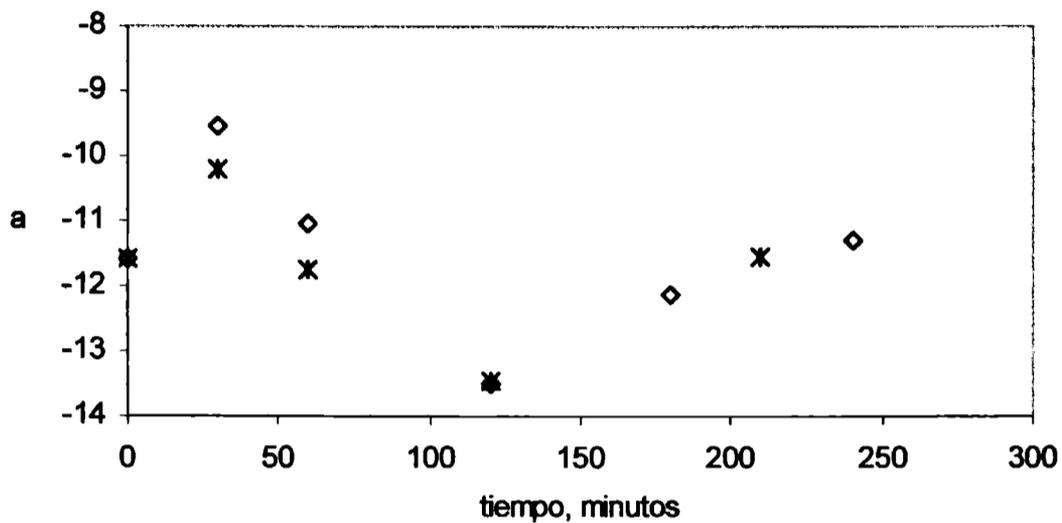
Los resultados de las medidas de los parámetros del color se resumen en la Tabla III.11 junto al desvío estándar correspondiente.

**Tabla III. 11.** Evolución de los atributos del color, con su respectivo desvío estándar, durante la deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa a 40 y 50 °C.

Deshidratación osmótica a 40 °C					
tiempo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	<i>Hue</i>	<i>chroma</i>
0	-11.57 ± 1.16	25.82 ± 1.09	71.31 ± 0.57	114.10 ± 1.55	28.30 ± 1.41
30	-9.52 ± 1.20	23.24 ± 0.87	67.96 ± 1.47	112.21 ± 1.96	25.13 ± 1.21
60	-11.03 ± 2.00	24.06 ± 0.44	65.96 ± 0.47	114.52 ± 3.78	26.51 ± 1.08
120	-13.51 ± 1.53	25.03 ± 0.67	68.76 ± 1.27	118.30 ± 2.40	28.46 ± 1.17
180	-12.11 ± 0.47	26.80 ± 0.68	66.85 ± 0.49	114.32 ± 1.12	29.42 ± 0.58
240	-11.29 ± 0.92	26.70 ± 1.12	67.74 ± 1.00	112.89 ± 0.96	28.99 ± 1.36
Deshidratación osmótica a 50 °C					
tiempo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	<i>Hue</i>	<i>chroma</i>
0	-11.57 ± 1.17	25.82 ± 1.09	71.30 ± 0.57	114.10 ± 1.55	28.30 ± 0.72
30	-10.19 ± 0.60	24.75 ± 0.71	69.80 ± 0.76	112.38 ± 1.25	26.73 ± 1.21
60	-11.73 ± 1.60	25.77 ± 0.88	68.02 ± 0.96	114.39 ± 2.18	28.33 ± 1.41
120	-13.46 ± 1.33	28.13 ± 0.87	68.12 ± 0.38	115.60 ± 1.72	31.19 ± 1.17
210	-11.53 ± 1.22	28.67 ± 0.24	66.34 ± 0.50	111.82 ± 1.98	30.42 ± 0.61

De las mediciones de los atributos del color se observa que los cambios del parámetro *a* no presentan una tendencia definida durante la deshidratación (Figura III.26), registrándose aproximadamente los mismos valores en la fruta fresca y después de 4 horas de deshidratación, contrariamente a lo observado durante el secado con aire caliente donde éste fue el parámetro que registró los cambios sistemáticos más importantes. Esto indicaría que no surgieron tonos rojos durante el tratamiento osmótico y coincide con observaciones

visuales informales donde se observó únicamente que se intensifica el color amarillo. Este comportamiento se mantiene a las dos temperaturas ensayadas, ya que la evaluación estadística de las lecturas de  $a$  indica que no existe diferencia significativa entre las medias de las lecturas a las dos temperaturas para un nivel de confianza del 95 %.



**Figura III. 26.** Medidas del atributo del color  $a$  durante la deshidratación osmótica de ananá en sacarosa a ( $\diamond$ ) 40 °C y ( $\ast$ ) 50 °C.

Los valores del parámetro  $b$ , que caracteriza las particularidades visuales “amarillas”, disminuyen durante la primera hora de inmersión en sacarosa, luego se incrementan y finalmente se estabilizan. Este comportamiento se repite durante el procesamiento a 40 y 50 °C, como se muestra en la Figura III.27, aunque el incremento en los valores de  $b$  se acentúa con la temperatura. Después de 4 horas de inmersión, la evaluación estadística de las lecturas de  $b$  muestra que existe diferencia significativa entre las medias de las lecturas a las dos temperaturas para un nivel de confianza del 95,0 %, suponiendo para esta comparación igualdad de varianza entre las mismas ( $p = 0.014$ ). Estas medidas confirman las observaciones visuales de incremento del color amarillo durante el proceso. Por otro lado, la Tabla III.11 muestra que la dispersión de las mediciones del parámetro  $b$  (valor del desvío estándar) son claramente menores que las dispersiones del parámetro  $a$ . El incremento en el amarillo puede ser el resultado de la concentración de los pigmentos en la matriz vegetal junto a la ganancia de sólidos.

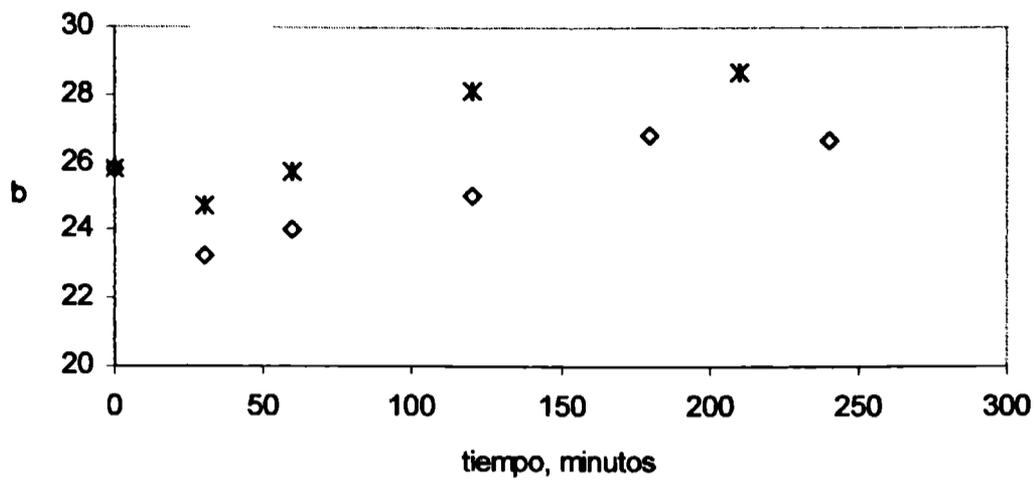


Figura III. 27. Medidas del atributo del color *b* durante la deshidratación osmótica de ananá en sacarosa a (◊) 40 °C y (✱) 50 °C.

Las observaciones visuales indican que las rodajas de ananá se tornan de un amarillo más intenso con el tiempo de procesamiento, lo cual en relación a los parámetros del color se espera disminución en la luminosidad. En la Figura III.28 se puede visualizar que durante la primera hora de tratamiento se produce una marcada disminución en los valores de *L*, que luego tienden a estabilizarse (a 40 °C) o continúan disminuyendo ligeramente (a 50 °C). Aún cuando el comportamiento (reducción de *L* con el tiempo) a 50 °C es más nítido que a 40 °C, el análisis estadístico indica que no hay diferencias significativas en las lecturas del parámetro *L* a las 4 horas de deshidratación osmótica, pudiendo afirmarse que la temperatura del proceso no afecta la luminosidad del producto después de la primer hora de proceso, en el rango de los ensayos (40-50 °C).

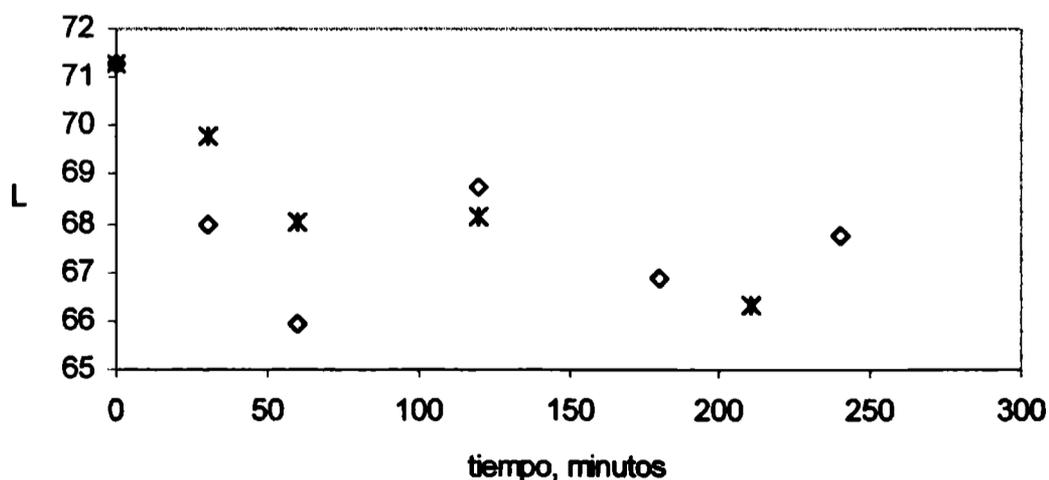
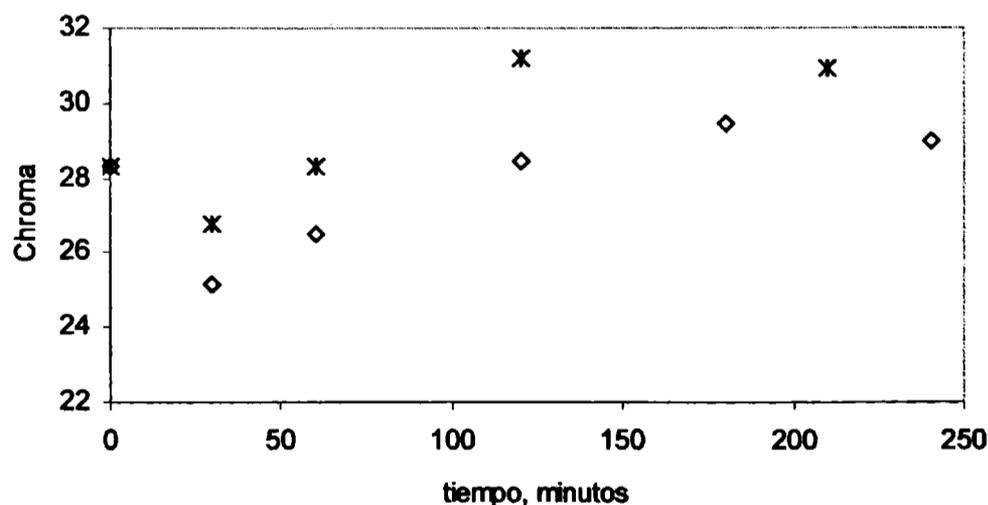


Figura III. 28. Valores del atributo del color *L* durante la deshidratación osmótica de ananá en sacarosa a (◊) 40 °C y (✱) 50 °C.

Los cambios en el amarillo observados durante la deshidratación osmótica de ananá pueden ser evaluados a través del *chroma*. Un incremento en los valores del *chroma* representa un color más puro e intenso. En la Figura III.29 se muestra la variación de este parámetro durante la deshidratación osmótica a 40 y 50 °C, donde se aprecia una disminución en sus valores medios durante la primera hora de procesamiento, para registrar un ligero incremento posterior. Este incremento es más importante a 50 °C que a 40 °C. Esto se esclarece con el análisis estadístico: existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los valores del *chroma* de muestras de ananá expuestas a 4 horas de DO a las dos temperaturas para un nivel de confianza del 95 % ( $p \leq 0.05$ ).

Rodrigues et al. (2003) describen comportamiento similar (disminución en los primeros tiempos y posterior incremento) de los valores del *chroma* durante diferentes condiciones de deshidratación osmótica de papaya. Estos autores relacionan el incremento en el *chroma* con la intensificación del color de la fruta durante el proceso osmótico.

Los valores del *hue* permanecen prácticamente sin cambios durante el proceso (Tabla III.11), contrariamente a lo que ocurre durante el secado, donde esta medida del color disminuye sistemáticamente.



**Figura III. 29.** Valores del *chroma* durante 4 horas de deshidratación osmótica de ananá en sacarosa a (◇) 40 °C y (✱) 50 °C.

### 3.14 Propiedades mecánicas

La variación de las propiedades mecánicas durante el proceso de deshidratación osmótica a 40 °C y 60 °Brix es presentada en la Tabla III.12.

Se puede observar un aumento sistemático en los valores de  $F_{max}$  (fuerza o resistencia a la fractura), lo que estaría indicando un incremento en la firmeza de los trozos de fruta. Este resultado se confirma con los valores de Tensión a la fractura ( $\sigma_{Hf}$ ), los que se incrementan regularmente durante el proceso osmótico.

El módulo de compresión, si bien exhibe alta dispersión de los resultados que se traduce en los valores del desvío estándar, es el parámetro que sufre los cambios más drásticos durante el proceso ya que su valor luego de cinco horas de tratamiento osmótico es tan solo del 12 % del valor inicial y estaría indicando una marcada disminución de la resistencia elástica del sistema. Este efecto, disminución en la pendiente inicial de la curva tensión-deformación, ha sido observado en la deshidratación osmótica de mango (Torres et al., 2006), kiwi, mango y frutilla (Chiralt et al., 2001), entre otros.

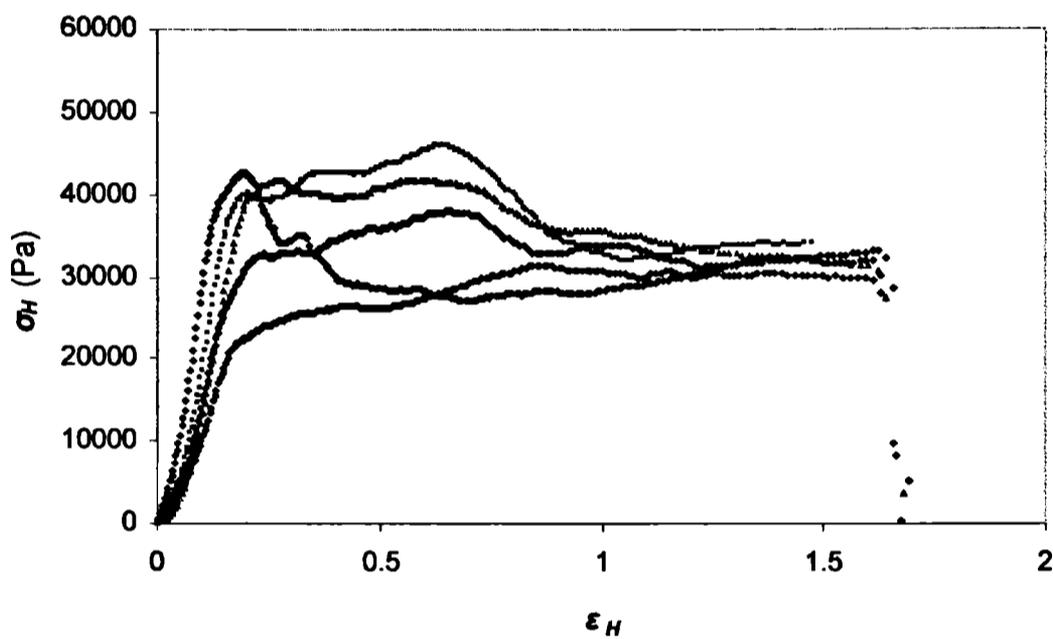
La deformación a la fractura ( $\epsilon_{Hf}$ ) aumenta radicalmente en los primeros tiempos del proceso osmótico y luego se estabiliza, para exhibir un ligero incremento luego de cuatro horas de proceso.

**Tabla III. 12.** Valores medios y desvío estándar de las propiedades mecánicas de medias rodajas de ananá durante un proceso de deshidratación osmótica

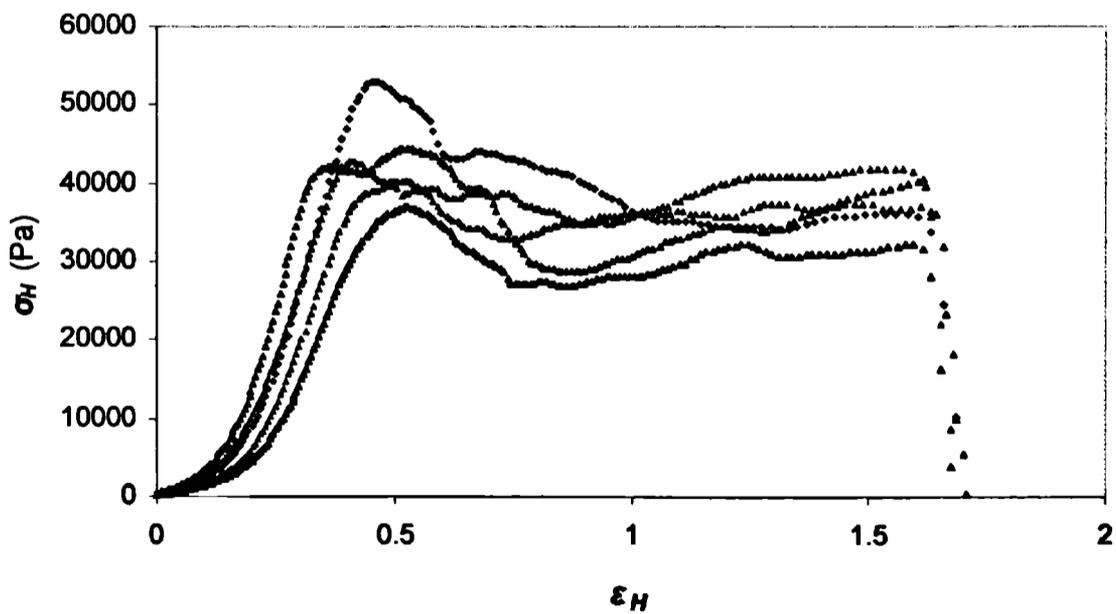
Parámetro	Tiempo (minutos)						
	0	30	60	120	180	240	300
$\sigma_{Hf}$ (kPa)	38.351	36.006	39.912	40.363	36.213	51.175	56.425
ds	7.170	4.463	3.131	7.464	4.141	11.709	6.086
$\epsilon_{Hf}$	0.269	0.454	0.358	0.422	0.412	0.600	0.478
ds	0.066	0.107	0.083	0.081	0.061	0.092	0.0409
$E$ (kPa)	100.985	73.939	68.244	45.897	16.635	16.499	12.974
ds	63.440	35.050	20.145	22.797	7.307	9.709	3.820
$F_{max}$ (N)	61.022	52.760	61.756	59.656	63.004	67.090	70.711
ds	3.396	0.547	5.629	3.745	8.600	13.949	6.969

En las Figuras III.30 y III.31 se muestran las medidas experimentales de las propiedades mecánicas de ananá fresco y ananá con cinco horas de deshidratación. Aquí se puede

comprobar que los cambios más importantes generados por el procesamiento osmótico radican en un aumento en la deformación a la fractura y en una disminución del módulo de elasticidad (pendiente inicial de las curvas) de la fruta. Estos resultados son parcialmente coincidentes con los publicados por Torres et al. (2006) en un estudio del efecto de la deshidratación osmótica de mangos, donde los autores registraron disminución de la pendiente inicial y de la tensión de fractura y aumento de la deformación a la fractura.



**Figura III. 30.** Curvas de compresión uniaxial de muestras de ananá fresco.



**Figura III. 31.** Curvas de compresión uniaxial de muestras de ananá con cinco horas de deshidratación osmótica en solución de sacarosa de 60 °Brix y 40 °C.

### **3.15 Rehidratación**

Usualmente las frutas son deshidratadas para prolongar su vida útil, minimizar los costos de almacenamiento y transporte, generar nuevos productos *ready-to-eat*, facilitar la elaboración de otros alimentos, etc., pero generalmente deben ser rehidratadas previo al consumo o elaboración. Durante la rehidratación se produce absorción de agua por el tejido vegetal. El estudio de la cinética de ganancia de agua permite obtener resultados de aplicación práctica de dos tipos: velocidad de rehidratación y capacidad de rehidratación o relación de reconstitución (Krokida & Marino-Kouris, 2003). Del primer grupo de resultados se puede inferir el tiempo mínimo necesario para obtener un producto adecuadamente rehidratado y del segundo grupo de resultados se puede estimar la cantidad de agua que puede absorber el alimento parcialmente seco. Estos datos suelen estar vinculados a la humedad inicial, el tiempo y la temperatura de rehidratación (Lewicki et al., 1998). En cualquier caso las propiedades de rehidratación de los vegetales son afectadas por las condiciones de deshidratación previas (Rastogi et al., 2004; Rastogi et al., 2000; Lewicki et al., 1998).

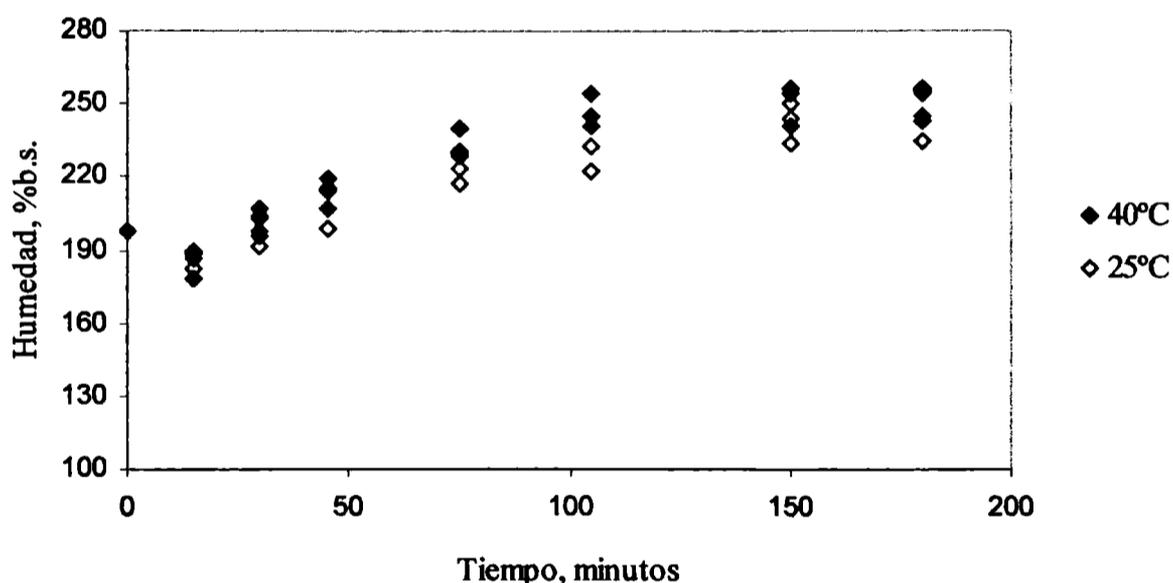
Los resultados experimentales del contenido de agua en la fruta fresca presentaron una amplia variabilidad, comprendidos entre el 600 %b.s. y el 900 %b.s. Para obviar el efecto de esta variable los ensayos de DO como pre-tratamiento de los estudios de rehidratación se realizaron sobre muestras obtenidas de una misma fruta, con contenido inicial de agua de 650 %b.s.

Con el objetivo de comparar el efecto de las condiciones del pre-tratamiento osmótico sobre las características de rehidratabilidad del ananá, se realizaron ensayos de DO a 40 °C y 50 °C. Se fijaron diferentes tiempos de deshidratación de manera de lograr un contenido de agua de aproximadamente 150 %b.s. Estos tiempos se estimaron en 240 y 190 minutos, respectivamente. Sin embargo, los valores de contenido de agua en el ananá deshidratado a 50 °C fueron inferiores a los valores de humedad de la fruta deshidratada a 40 °C (Figuras III.32 y III.33).

En las condiciones experimentales de rehidratación (25 y 40 °C), la fruta deshidratada a 40 °C alcanzó en tres horas de inmersión en agua un valor máximo del contenido de agua de 255 %b.s., como se muestra en la Figura III.32. Para cuantificar la máxima absorción de agua, se prolongó la rehidratación por un período de diez horas, al cabo del cual el

contenido de agua calculado fue de  $257 \pm 10$  %b.s. a las dos temperaturas de rehidratación. La velocidad de absorción de agua disminuye aproximadamente a la mitad luego de aproximadamente 60 minutos de rehidratación. A los 120 minutos de rehidratación la velocidad del proceso es de aproximadamente 0.01 g de agua/minuto. Se consideró humedad de saturación la registrada a los 160 minutos de rehidratación, ya que a tiempos mayores el contenido de agua prácticamente permanece constante (por ejemplo, en una de las muestras el contenido de agua se incrementó de 236.04 a 239.38 en 30 minutos adicionales). Durante la primera hora de rehidratación se absorbió el 60 % del agua total ganada en 3 h de rehidratación.

En la Figura III.32 se registra una disminución de humedad en los primeros 15 minutos de rehidratación. Esto se debe a que la evolución de la humedad se calcula en función del aumento de peso de cada muestra y en los primeros tiempos de inmersión en agua la pérdida de peso debido a la disolución y migración de la sacarosa retenida en los poros superficiales de la fruta puede ser más importante que la ganancia de agua.

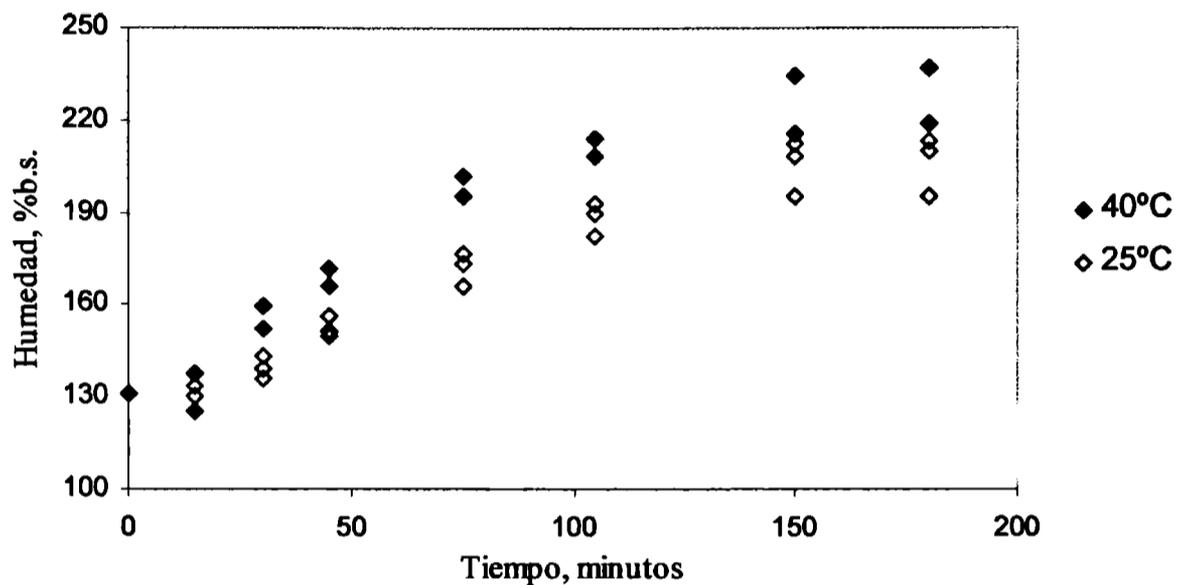


**Figura III. 32.** Evolución del contenido de agua durante la rehidratación a 25 y 40 °C, de medias rodajas de ananá deshidratadas en solución de sacarosa a 40 °C.

La fruta pre-deshidratada a 50 °C alcanzó en tres horas de rehidratación un valor máximo del contenido de agua de 230 %b.s., como se muestra en la Figura III.33. El contenido de agua calculado al final de un período de rehidratación de diez horas fue de  $212 \pm 8$  %b.s. a 25 °C y de  $236 \pm 13$  %b.s. a 40 °C. Como se puede comparar, la capacidad de rehidratación de la fruta pre-deshidratada a 50 °C es inferior que la fruta pre-deshidratada a 40 °C,

posiblemente debido a daños en la estructura del tejido vegetal causado por el aumento de la temperatura del proceso.

En estas muestras, ananá pre-deshidratado a 50 °C, el efecto de la temperatura de rehidratación es más drástico. El análisis estadístico señala que los valores medios de humedad para cada tiempo de rehidratación a 25 °C y 40 °C presentan diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ).

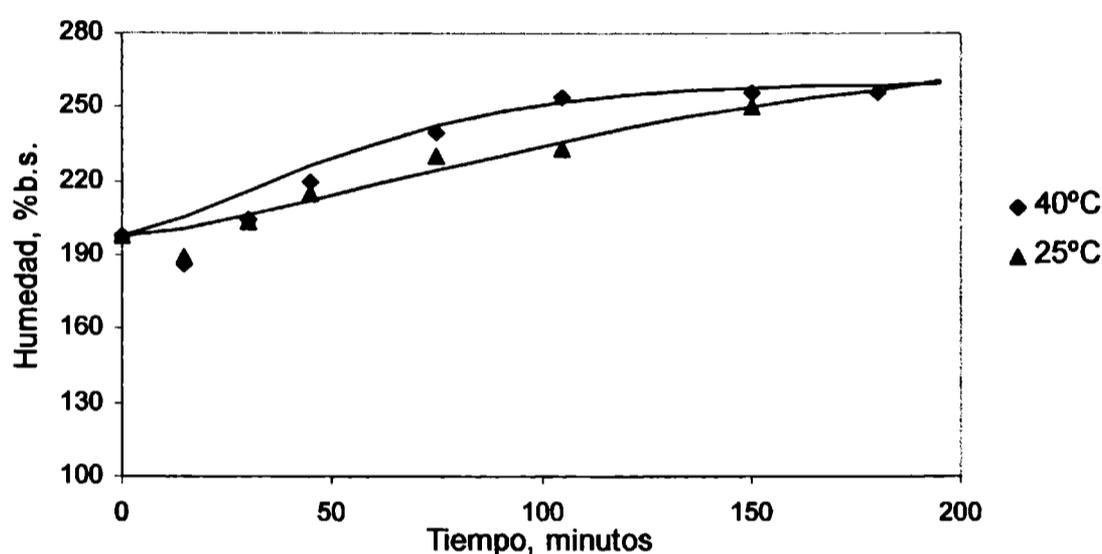


**Figura III. 33.** Evolución del contenido de agua durante la rehidratación a 25 y 40 °C, de medias rodajas de ananá deshidratadas en solución de sacarosa a 50 °C.

Debido a que la humedad de saturación, es muy inferior a la humedad de la fruta fresca se puede inferir que los cambios estructurales que ocurren en el tejido vegetal durante el proceso de deshidratación osmótica son irreversibles. Por otra parte, la humedad al final de la rehidratación de las muestras de ananá pre-secadas con aire caliente es, en todos los casos, superior a la humedad que alcanzan las muestras pre-deshidratadas con solución de sacarosa. Este fenómeno se podría explicar sobre la base de que las frutas deshidratadas por ósmosis son menos porosas, puesto que la solución del azúcar difunde en los espacios intercelulares y a lo largo de las paredes de célula (Prothon et al., 2001), fundamentalmente en la capa superficial. Las paredes celulares son menos permeables al agua debido a la interacción/absorción de las moléculas de sacarosa en el material de la pared de célula. Prothon et al. (2001) demostraron que las paredes celulares del tejido de manzana son más gruesas después de un período prolongado de inmersión en solución de sacarosa. Este fenómeno de engrosamiento de las paredes celulares después del tratamiento osmótico

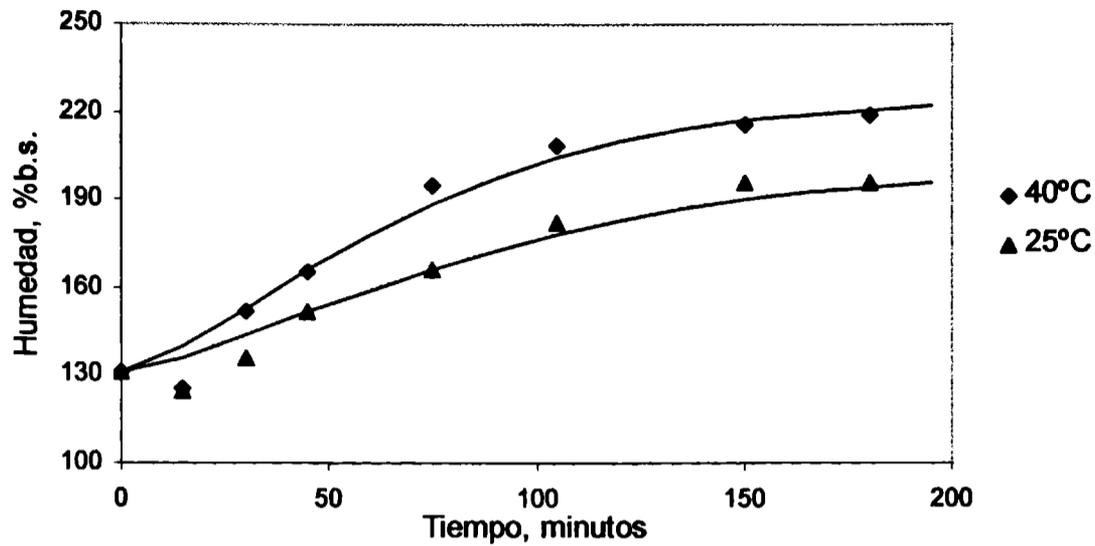
podría explicar el hecho de que la fruta pre-deshidratada tiene más dificultad a la rehidratación comparada las muestras secadas con aire.

Conociendo la relación de humedad (Ec. II.22) en función del tiempo, se determinaron los valores de K y N del modelo de Page, a dos temperaturas de rehidratación. Datos experimentales de  $\ln(MR)$  y el tiempo fueron procesados mediante análisis de regresión minimizando el error estándar de la desviación para determinar los parámetros K y N. Los valores de  $r^2$  fueron mayores a 0.96 en las muestras deshidratadas a 50 °C y mayores a 0.91 en las muestras deshidratadas a 40 °C, mostrando que el modelo de Page describe adecuadamente la ganancia de agua en ananá en función del tiempo de rehidratación.



**Figura III.34.** Contenido de agua experimental (símbolos) y predicho por el modelo de Page (línea continua) durante la rehidratación, a 25 y 40 °C, de medias rodajas de ananá deshidratadas a 40 °C.

Valores experimentales y predichos por el modelo de Page del contenido de agua de medias rodajas de ananá pre-deshidratadas a 40 °C durante el proceso de rehidratación a 40 y 25 °C se muestran en la Figura III.34. Los valores predichos estuvieron próximos a los experimentales, como se manifiesta en los valores del error relativo promedio porcentual (Epp) de la estimación, calificados entre 2.4 % y 2.6 %, como se muestra en la Tabla III.12. El parámetro N permanece constante, siendo independiente de la temperatura del proceso previo de deshidratación osmótica.



**Figura III.35.** Contenido de agua experimental (símbolos) y predicho por el modelo de Page (línea continua) durante la rehidratación a 25 y 40 °C, de medias rodajas de ananá deshidratadas a 50 °C.

Valores experimentales y predichos por el modelo de Page del contenido de agua de medias rodajas de ananá pre-deshidratadas a 50 °C durante el proceso de rehidratación a 40 y 25 °C se muestran en la Figura III.35. Aquí se muestra claramente la diferencia en los valores de humedad de las muestras rehidratadas a 25 °C y a 40 °C a partir de los 30 minutos de inmersión en agua. El modelo de Page no explica la pérdida de peso de las muestras en los primeros minutos de rehidratación, pero aproxima adecuadamente a los valores experimentales para tiempos de rehidratación mayores de 30 minutos.

El parámetro K puede ser considerado como una medida de la velocidad de ganancia de agua cuando se comparan experiencias cuyos valores de N sean iguales. De esta manera se observó que K aumenta con la temperatura de rehidratación y muestra poca dependencia con la temperatura del pre-tratamiento de deshidratación (Tabla III.13).

**Tabla III. 13.** Parámetros de la ecuación de Page y el error promedio porcentual (Epp) de las estimaciones.

Temperatura de deshidratación	Rehidratación a 25 °C			Rehidratación a 40 °C		
	K	N	Epp	K	N	Epp
40 °C	0.0013±0.0002	1.4	2.4	0.0026±0.0006	1.4	2.6
50 °C	0.0016±0.0001	1.4	2.3	0.0021±0.0002	1.4	2.2

La relación de rehidratación (RR), calculada de acuerdo a la Ecuación II.19, aumenta con el tiempo y con la temperatura del proceso de rehidratación y, además, con la temperatura del pre-tratamiento de deshidratación (Figura III.36). Las muestras de ananá pre-deshidratadas a 50 °C se ven más afectadas por la temperatura del proceso de rehidratación que aquellas pre-deshidratadas a 40 °C. En la Figura III.36 se puede ver que los valores del coeficiente RR calculados a partir de los resultados experimentales de la rehidratación a 25 °C son menores que los análogos a 40 °C, para rodajas de ananá pre-deshidratado a 50 °C; en tanto que para rodajas de ananá pre-deshidratado a 40 °C prácticamente no existen diferencias entre los valores de RR calculados a partir de datos de rehidratación a 25 °C y a 40 °C. En esta figura los símbolos caracterizados por DO40-R25 representan los resultados experimentales de las muestras de ananá pre-deshidratadas a 40 °C y rehidratadas a 25 °C. La máxima relación de rehidratación de las muestras presenta una tendencia positiva con la temperatura del proceso de deshidratación previo, como se muestra en la Tabla III.14.

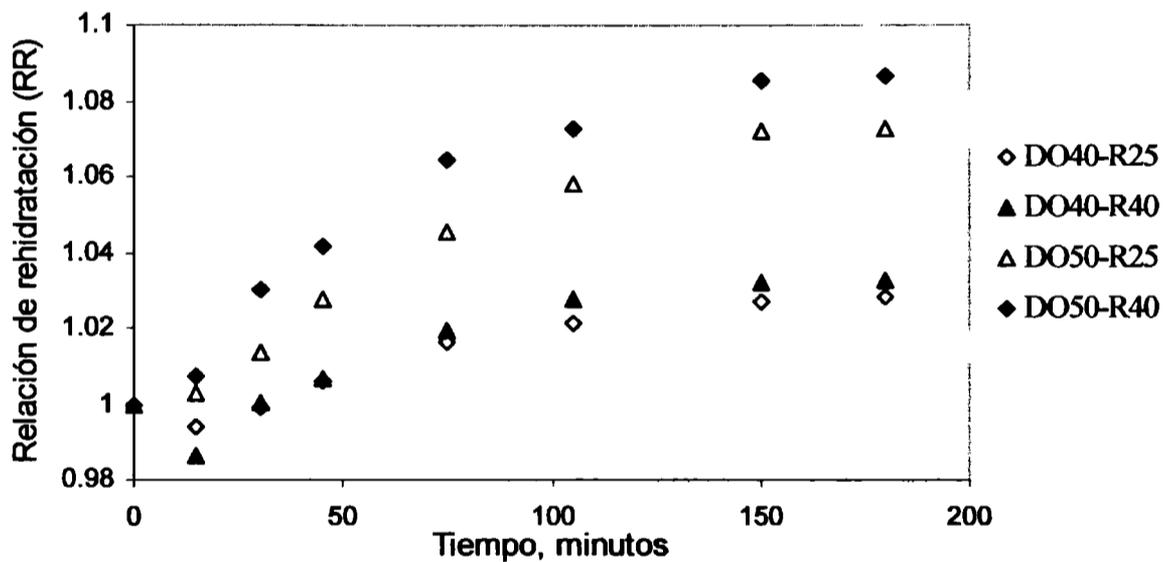


Figura III. 36. Influencia de la temperatura de rehidratación sobre la reconstitución experimental (relación de rehidratación) de ananá pre-deshidratado en diferentes condiciones.

Información complementaria de la capacidad de rehidratación se obtuvo en términos del coeficiente de rehidratación COR (Ecuación II.20), con los datos recogidos luego de un período de rehidratación de 3 horas. El COR aumenta con la temperatura del proceso de rehidratación y disminuye con la temperatura del pre-tratamiento de deshidratación (Tabla III.14). Los valores medios de este coeficiente estarían indicando una mayor habilidad de hidratación en las muestras de ananá pre-tratadas a 40 °C.

**Tabla III. 14.** Características de rehidratación (3 h) de ananá deshidratado en solución de sacarosa a diferentes temperaturas.

Temperatura de deshidratación	Rehidratación a 25 °C		Rehidratación a 40 °C	
	COR	RR	COR	RR
40 °C	0.459 ± 0.013	1.027 ± 0.005	0.467 ± 0.010	1.032 ± 0.001
50 °C	0.396 ± 0.019	1.067 ± 0.006	0.437 ± 0.017	1.082 ± 0.007

Los resultados sintetizados en la Tabla III.14 evidencian diferencias contradictorias entre los valores del COR y del RR. Este hecho ya ha sido remarcado por Lewicki et al. (1998) para otros productos. Por otra parte, si se comparan estos valores con los obtenidos en las muestras presecadas con aire (Tabla II.6) se puede observar que los valores del COR exhiben poca diferencia para muestras de ananá provenientes de los dos pre-tratamientos de deshidratación.

Al mismo tiempo, el análisis de los datos de rehidratación en idénticas condiciones indica que las muestras de ananá presecadas con aire caliente exhibieron valores de humedad de aproximadamente el doble en magnitud que aquellas pre-deshidratadas osmóticamente. Estos resultados experimentales son contradictorios a la tendencia que marcan los valores del COR. De allí que este parámetro no puede ser considerado una medida real de la habilidad del ananá a la rehidratación.

#### **4. Conclusiones**

Se observó que la deshidratación osmótica afecta el tamaño y la forma de las células y, en consecuencia, cambian las dimensiones de los espacios intercelulares. Este cambio no fue proporcional y sistemático en todos los espacios extracelulares, sino que se observó la aparición de un número de grandes canales en algunas ubicaciones. Se registraron diferentes respuestas de las células en función a las características propias de las mismas. Al cabo de un período de deshidratación prolongado (360 minutos) se observó la presencia de numerosas burbujas de aire, que se aglomeraron en el interior del tejido, muy pocas en espacios cercanos a la superficie en contacto con la solución hipertónica.

La deshidratación osmótica, y el consecuente aumento en la concentración de azúcar, tienden a incrementar la naturaleza viscosa de la fruta y disminuir su elasticidad.

Durante el proceso de deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá de 0.6 cm de espesor en solución de sacarosa al 60 % p/p se alcanza un contenido de agua de equilibrio en la fruta que está en el rango de 34 a 36 g de agua/100g de sólido y es prácticamente independiente de la temperatura del tratamiento. El contenido de azúcar de equilibrio en ananá se incrementó del 45 al 54 g de sacarosa/100g de sólido cuando la temperatura se elevó de 30 a 50°C. La variación del espesor de las rodajas fue independiente de la temperatura y se encontró que sigue una la relación lineal entre  $S_v$  y  $\ln(W/W_0)$ .

De los resultados obtenidos del contenido de glucosa y fructosa se observó que a 30 y 40 °C no se registran variaciones apreciables de estos azúcares durante el proceso; en cambio a 50 °C se observa una disminución en el contenido de estos compuestos, posiblemente debido al arrastre de los mismos por la corriente de agua que sale de la fruta. Estos resultados se correlacionan con la velocidad relativa de difusión del agua respecto del azúcar ( $D_w/D_s$ ) que presenta un aumento del 35 % al aumentar la temperatura de 30 a 50 °C.

Del estudio de hidrólisis de sacarosa dentro de la fruta durante el procesamiento se concluye que las concentraciones de glucosa, fructosa y sacarosa se mantienen sin variación durante los primeros 330 minutos a 45 °C.

Los resultados de la composición en función de la distancia desde la superficie en contacto con la solución hipertónica de sacarosa y del tiempo, mostraron que solo existe perfil de humedad y concentración de sacarosa en los dos primeros milímetros de espesor desde la superficie y que la forma de este perfil no varía con el tiempo, para los tiempos en estudio (de 30 a 150 minutos) y a 40 °C. Además, se observó que las concentraciones de glucosa y fructosa permanecen aproximadamente constantes en función de la distancia desde el borde.

El proceso de deshidratación osmótica con sacarosa genera cambios en el color global del ananá y los cambios más importantes ocurren en la primera hora de inmersión. Se registró una disminución en los valores medios del *chroma* durante la primera hora de procesamiento, para registrar un ligero incremento posterior. Este incremento es más importante a 50 °C que a 40 °C. Los valores del *hue* permanecen prácticamente sin cambios durante el proceso.

Se observó que la pérdida de ácido ascórbico es fuertemente afectada por la temperatura del proceso, así el tiempo necesario para alcanzar determinado valor de  $W/W_0$  es levemente

inferior a 50 °C que a 40 °C, sin embargo la retención de ácido ascórbico es considerablemente mayor a 40 °C.

La capacidad de rehidratación de la fruta pre-deshidratada a 50 °C es inferior que la fruta pre-deshidratada a 40 °C, posiblemente debido a daños en la estructura del tejido vegetal causados por el aumento de la temperatura del proceso. El modelo de Page describe adecuadamente la ganancia de agua en ananá en función del tiempo de rehidratación, con valores del error relativo promedio porcentual de la estimación entre 2.4 % y 2.6 %.

El modelo utilizado para simular la transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica posee tres características favorables: es realista al considerar los cambios en el volumen del material, ajusta muy bien a los datos experimentales a tiempos cortos al tomar varios términos de la serie y es de fácil aplicación para predecir la pérdida de agua y la ganancia de sacarosa.

Las medidas de la velocidad de pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de ananá señalan que la temperatura más apropiada para el proceso es 40 °C, ya que a 30 °C la velocidad de deshidratación es marcadamente inferior y a 50 °C los valores de velocidad son aproximadamente iguales que a 40 °C pero con las desventajas que involucran los procesos a mayor temperatura (mayor insumo energético, mayor pérdida de nutrientes, etc.).

## **Bibliografía**

Acharyaviriya, S., Soponronnarit, S.; Terdyothin, A. 2000. Diffusion model of papaya and mango glaze drying. *Drying Technology*, 18:1605-1615.

Ade-Omowaye, B.I.; Rastogi, N.K.; Angersbach, A.; Knorr, D. 2002. Osmotic dehydration of bell peppers: influence of high intensity electric field pulses and elevated temperature treatment. *Journal of Food Engineering*, 54: 35–43.

A.O.A.C. 1984. Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis. 14ed. Washington.

Azuara, E.; Cortés, R.; García, H.; Beristain, C. 1992. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's Second Law. *International Journal of Food Science and Technology*. 27: 409-418.

Beristain, C.; Azuara, E.; Cortés, R.; García, H. 1990. Mass Transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *International Journal of Food Science and Technology*, 25: 576-582.

- Bolin, H.R.; Huxsoll, C.C. 1993, Partial drying pears to improve freeze/thaw texture. *Journal of Food Science*, 58: 357-360.
- Buchweitz, P.R. 2005. Avaliação da pre-secagem osmótica de kiwi (*Actinidia deliciosa*) complementada por processos convencionais. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
- Cao, H.; Min, Z.; Mujumdar, A.; Du, W.; Sun, J. 2006. Optimization of osmotic dehydration of kiwifruit. *Drying Technology*, 24: 89-94.
- Castro, D.; Fito, P.; Treto, O.; Boys, T.; Nuñez de Villavicencio, M. 1998. Influencia de la presión y otras variables de proceso en la transferencia de masa de piña deshidratada osmóticamente. Evaluación energética y estimación de costos. II Parte. *La Alimentación Latinoamericana*, N° 225, 33.
- Chiralt, A.; Fito, P.; Barat, J.; Andrés, A.; González-Martínez, C.; Escriche, I.; Camacho, M. 2001. Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering*, 49: 141-151.
- Chiralt, A.; Talens, P. 2005. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67: 167–177.
- Chutintrasri, B.; Noomhorm, A. 2007. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 40: 300-306.
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2<sup>nd</sup> edition., Oxford University Press Inc., New York.
- Erle, U.; Schubert, H. 2001. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering*, 49: 193-199.
- Eshtiaghi, M.N.; Stute, R.; Knorr, D. 1994. High-pressure and freezing pretreatment effects on drying, rehydration, texture and color of green beans, Carrots and Potatoes. *Journal of Food Science*, 59: 1168–1170.
- Evans, S.; Brambilla, A.; Lane, D.; Torreggiani, D.; Hall, L.D. 2002. Magnetic resonance imaging of strawberry (*Fragaria vesca*) slices during osmotic dehydration and air drying. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 35: 177–184.
- Falade, K.; Igbeka, J.; Ayanwuyi, F.A. 2007. Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80: 979–985.
- Feng, H., Tang, J.; Dixon-Warren, J. 2000. Determination of moisture diffusivity of red delicious apple tissues by thermogravimetric analysis. *Drying Technology*, 18: 1183-1199.
- Fennema, O.R. 1993. *Química de los Alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia
- Ferrando, M.; Spiess, W.E. 2001. Cellular response of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose and trehalose solutions. *Journal of Food Engineering*, 49: 115-127.
- Giannakourou, M.C.; Taoukis, P.S. 2003. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions. *Food Chemistry*, 83: 33–41.
- Hough, G.; Chirife, J.; Marini, C. 1993. A simple model for osmotic dehydration of apples.

Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 26: 151-156.

Jena, S.; Das, H. 2005. Modelling for moisture variation during osmo-concentration in apple and pineapple. *Journal of Food Engineering*, 66(4): 425-432

Karatas, S.; Pinarh, I. 2001. Determination of moisture diffusivity of pine nut seed. *Drying Technology*, 19: 701-708.

Kaymak-Ertekin, F.; Sultanoğlu, M. 2000. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46: 243-250.

Krokida, M.K.; Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1-7.

Lazarides, H.N.; Gekas, V.; Mavroudis, N. 1997. Apparent mass diffusivities in fruit and vegetable tissues undergoing osmotic processing. *Journal of Food Engineering*, 31: 315-324.

Lewicki, P.P.; Porzecka-Pawlak, R. 2005. Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering*, 66: 43-50.

Lewicki, P.P.; Witrowa-Rajchert, D.; Pomaranska-Lazuka, W.; Nowak, D. 1998. Rehydration properties of dried onion. *International Journal of Food Properties*, 1: 275-290.

Lozano, J., Rotstein, E.; Urbicain, M.J. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48: 1497-1502.

Mao, R.; Tang, J.; Swanson, B.G. 2000. Texture properties of high and low acyl mixed gellan gels. *Carbohydrate Polymers*, 41: 331-338.

Marcotte, M.; Le Maguer, M. 1992. Mass transfer in cellular tissues. Part II: Computer simulations vs experimental data. *Journal of Food Engineering*, 17: 177-199.

Mavroudis, N., Gekas, V.; Sjöholm, I. 1998. Osmotic dehydration of apples. Shrinkage phenomena and the significance of initial structure on mass transfer rates. *Journal of Food Engineering*, 38: 101-123.

Miller, E.; Hall, G. 1953. Distribution of total soluble solids, ascorbic acid, total acid, and bromelin activity in The Fruit of the Natal Pineapple (*Ananas Comosus L. merr*). *Plant Physiol.*; 28: 532-534.

Moreira, R.; Sereno, A. 2003. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering* 57: 25-31.

Nicoletti, J.F., Telis-Romero, J.; Telis, V.R.N. 2001. Air-Drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: Fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. *Drying Technology*, 19: 2175-2191.

Nsonzi, F.; Ramaswamy, H. 1998. Osmotic dehydration kinetics of blueberries. *Drying Technology* 16: 725-741.

Panagiotou, N.M.; Karathanos, V.T.; & Maroulis, Z.B. 1998. Mass transfer modeling of the osmotic dehydration of some fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, 33: 267-284.

- Peiro, R.; Dias, V.; Camacho M.; Martínez-Navarrete, N. 2006. Micronutrient flow to the osmotic solution during grapefruit osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 74: 299–307.
- Prothon, F.; Ahmé, L.; Funebo, T.; Kidman, S.; Langton, M.; Sjöholm, I. 2001. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 34: 95-101.
- Pujol, C.; Kado, C. 2000. Genetic and biochemical characterization of the pathway in *Pantoea citrea* leading to pink disease of pineapple. *J. of Bacteriology*, 182: 2230–2237.
- Rahman, M.S.; Perera, C. 1996. Osmotic dehydration: a pretreatment for fruit and vegetables to improve quality and process efficiency. *The Food Technologist*, 25: 144-147.
- Ramallo, L.A. 2001. *Deshidratación osmótica de ananá: Un modelo matemático sencillo*. Magister Thesis, UNaM, Argentina.
- Rastogi, N.K.; Angersbach, A.; Niranjana, K.; Knorr, D. 2000. Rehydration kinetics of high-pressure pretreated and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Science*, 65: 838-840.
- Rastogi, N.K.; Nayak, C.A.; Raghavarao, K.S. 2004. Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering*, 65: 287–292.
- Rastogi, N.K.; Raghavarao, K.S.; Niranjana, K. 1997. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. *Journal of Food Engineering*, 31: 423–432.
- Rastogi, N.K.; Niranjana, K. 1998. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *Journal of Food Science*, 63: 508-511.
- Rastogi, N.K.; Raghavarao, K. 1998. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 34: 429-441.
- Rastogi, N.K.; Raghavarao, K. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 37: 43-47.
- Renkema, J.; Knabben, J.; van Vliet, T. 2001. Gel formation by  $\beta$ -conglycinin and glycinin and their mixtures. *Foods Hydrocolloids*, 15: 407-414.
- Reppa, A., Mandala, J., Kostaropoulos, A.; Saravacos, G. 1999. Influence of solute temperature and concentration on the combined osmotic and air drying. *Drying Technology*, 17: 1449-1458.
- Ribeiro, K.O.; Rodrigues, M.I.; Sabadini, E.; Cunha, R.L. 2003. Mechanical properties of acid sodium caseinate-k-carrageenan gels: effect of co-solute addition. *Food Hydrocolloids*, 18: 71–79.
- Rodrigues, A.; Cunha, R.; Hubinger, M. 2003. Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering*, 59: 129–135.
- Sabadini, E.; Carvalho, B.; Sobral, P.; Hubinger, M. 1998. Mass transfer and diffusion

- coefficient determination in the wet and dry salting of meat. *Drying Technology*, 16: 2095-2115.
- Salvatori, D.; Andrés, A.; Albors, A.; Chiralt, A.; Fito, P. 1998. Structural and compositional profiles in osmotically dehydrated apple. *Journal of Food Science*, 63: 606-610.
- Salvatori, D.; Alzamora, S.M. 2000. Structural changes and mass transfer during glucose infusion of apples as affected by blanching and process variables. *Drying Technology*, 18: 361-382.
- Sander, A.; Tomas, S.; Skansi, D. 1998. The influence of air temperature on effective diffusion coefficient of moisture in the falling rate period. *Drying Technology*, 16: 1487-1499.
- Saputra, D. 2001. Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology*, 19: 415-425.
- Saurel, R.; Raoult-Wack, A.; Rios, G.; Guilbert, S. 1994. Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. *International J. of Food Sci. and Technology*, 29: 531-542.
- Sereno, A.M.; Moreira, R.; Martinez, E. 2001. Mass transfer coefficients during dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, 47(1): 43-49.
- Spiazzi, E.A.; Mascheroni, R.H. 1997. Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables- I. Development of the Simulation Model. *J. of Food Engineering*, 34:387-410.
- Talens, P.; Martínez-Navarrete, N.; Fito, P.; Chiralt, A. 2002. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3:191-199.
- Tan, M.; Chua, K.J.; Mujumdar, A.S.; Chou, S.K. 2001. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *Drying Technology*, 19(9): 2193-2209.
- Tomasichio, M.; Andreotti, R.; Giorgi, A. 1986. Disidratazione parziale della frutta per osmosi II. Ananas, fragole e susini. *Industria Conserve*, 61: 108-114.
- Torregiani, D. 1993. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, 26: 59-68.
- Torres, J.; Talens, P.; Escriche, I.; Chiralt, A. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 74: 240-246.
- Vial, C.; Guilbert, S.; Cuq, J. 1991. Osmotic dehydration of kiwi fruits: influence of process variables on the color and ascorbic acid content. *Sciences des Aliments*, 11(1): 63-84.
- Waliszewski, K.; Delgado, J.; García, M. 2002. Equilibrium concentration and water and sucrose diffusivity in osmotic dehydration of pineapple slabs. *Drying Technology*, 20(2): 527-538.

Waliszewski, K.N., Texon, N.I., Salgado, M.A.; García, M.A. 1997. Mass transfer in banana chips during osmotic dehydration. *Drying Technology*, 15: 2597-2607.

Yao, Z.; Le Maguer, M. 1997. Analysis of mass transfer in osmotic dehydration based on profiles of concentration, shrinkage, transmembrane flux and bulk flow velocity in the domain of time and space. *J. of Food Process Engineering*, 20: 401-414.

## **Capítulo IV**

### **Deshidratación Osmótica con pulsos de vacío**

## **Resumen**

La DO con pulsos de vacío es una técnica que consiste en sumergir el alimento en una solución osmótica y aplicar, una o más veces, presión sub-atmosférica durante un corto intervalo de tiempo seguido de un período de DO a presión atmosférica. De esta manera se introduce una cantidad adicional de solución osmótica en los poros del alimento por mecanismos hidrodinámicos y, en consecuencia, se espera algún beneficio adicional sobre la velocidad de transferencia de masa debido al incremento de la superficie de contacto al eliminar el aire ocluido dentro del tejido.

En esta etapa del trabajo se analizó el efecto de la intensidad y duración de los pulsos de vacío sobre la transferencia de masa y los cambios de las propiedades mecánicas, durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá y se aplicó la segunda Ley de Fick de la difusión para evaluar cuantitativamente la velocidad de transferencia de masa. En base a los resultados obtenidos en la etapa previa de deshidratación osmótica a presión atmosférica, principalmente la cinética de pérdida de agua, ganancia de sacarosa y pérdida de vitamina C, se seleccionó la condición de 40°C de temperatura para los posteriores estudios de deshidratación osmótica con vacío pulsante.

A tal fin se trabajó con medias rodajas de fruta de 0,6 cm de espesor y  $11,5 \pm 0,5$  cm de diámetro. Estas muestras fueron deshidratadas en solución de sacarosa de 60 °Brix y 40 °C, con movimiento de fluido por recirculación. Se aplicaron siete tratamientos diferentes combinando presión atmosférica normal y pulsos de vacío de diferente intensidad (100 y 250 mbar) con distinta duración (5, 15 y 25 minutos). Durante los ensayos, además de los valores de pérdida de peso, contenido de humedad, grados brix y acidez total, se registraron los datos de fuerza  $F(t)$  (N) y altura  $H(t)$  (m). Estos datos fueron posteriormente convertidos a los parámetros de Hencky.

## **1. Introducción**

En el proceso de deshidratación osmótica la velocidad del proceso y la relación pérdida de agua/ganancia de soluto depende de múltiples variables: concentración y composición química de la solución osmótica, temperatura, forma y tamaño de las muestras, etc. En los últimos años se ha prestado atención a un factor adicional, ensayando la aplicación de vacío y pulsos de vacío durante el tratamiento osmótico, con el objetivo de optimizar la calidad del alimento (Chiralt et al., 2001a,b; Barat et al., 2002; Torres et al., 2006) y analizar las modificaciones cinéticas generadas (Shi et al., 1995; Chiralt et al., 2001b; Barat et al., 2002; Giraldo et al., 2003). Estudios efectuados sobre diferentes tipos de frutas indican que, bajo determinadas condiciones del proceso, el vacío pulsante favorece la ganancia de azúcar (Castro et al., 1998a, b); Shi et al. (1995) demostraron que este fenómeno depende de la porosidad del tejido. Se denomina deshidratación osmótica al vacío pulsante o con pulsos de vacío al proceso en el cual cortos tiempos de vacío son aplicados al sistema, seguidos de períodos a presión atmosférica. La complejidad y variabilidad de la estructura y de la respuesta fisiológica del tejido vegetal al proceso osmótico, hizo difícil tanto el establecimiento de modelos que expliquen la cinética de transferencia de masa, como así también el desarrollo de modelos para describir los cambios físicos y químicos inducidos en el producto.

La transferencia de masa durante la deshidratación osmótica con vacío ha sido descrita mediante modelos que combinan la difusión fickiana y el flujo por capilaridad (Shi & Fito, 1994; Chiralt et al., 2001a); a través de la aproximación clásica de transferencia osmótica de masa (Rastogi & Raghavarao, 1996); mediante soluciones empíricas (Castro et al., 1998b; Corzo et al., 2007); aplicando las soluciones analíticas de la Ley de Fick o expresiones simplificadas de las mismas (Shi et al., 1995; Giraldo et al., 2003).

En general, la pérdida de humedad y la ganancia de soluto durante la deshidratación osmótica de materiales biológicos son descritas mediante el modelo analítico de difusión que resulta de la integración de la 2da ley de Fick (Azoubel & Murr, 2004; Jena & Das, 2005; Khin et al., 2006).

Es sabido que las transformaciones físicas y químicas que ocurren en las frutas durante los procesos de deshidratación afectan las características macroscópicas del producto tales

como color, apariencia y textura, en diferente medida de acuerdo a las condiciones del proceso y a la naturaleza del producto (Rodrigues et al., 2003; Torres et al., 2006). Los diversos tejidos vegetales responden de manera particular a la tensión osmótica y es necesario estudiar las condiciones de proceso aplicable a un producto determinado en función de su uso final.

El intercambio gas-líquido que ocurre en el tejido cuando se aplican pulsos de vacío desempeña un papel relevante en las características físicas y químicas del alimento (Chiralt & Talens, 2005). Consecuentemente, afecta sus propiedades sensoriales entre las que se encuentra la textura.

Chiralt et al. (2001b) encontraron que la aplicación de pulsos de vacío durante la deshidratación osmótica de kiwi afecta significativamente algunas propiedades mecánicas, como el módulo de deformación  $\epsilon_{HF}$ , sin alterar otras. Moreno et al. (2000) encontraron diferencias microestructurales significativas entre frutillas deshidratadas a presión atmosférica y con vacío pulsante; estas diferencias no se reflejaron en algunos parámetros mecánicos, como la  $F_{max}$ . No se tienen registros de los cambios en las propiedades mecánicas del ananá durante el proceso de deshidratación osmótica con pulso de vacío.

Shi et al. (1995) encontraron, analizando la deshidratación de ananá a 40 °C y 65 °Brix, durante 3 horas, que la aplicación de vacío pulsante (5 minutos a 100 mbar y 25 minutos a presión normal, en forma reiterativa durante todo el proceso) aumenta la pérdida de agua y no afecta la ganancia de sólidos. Barat et al. (2002) desarrollaron un esquema de tratamiento osmótico con pulsos de vacío combinando sucesivos pasos de inmersión de cubos de ananá en solución de sacarosa de diferentes concentraciones, a baja temperatura, con el objetivo de lograr un producto de alto contenido de sacarosa y demostraron que es posible incrementar el grado de impregnación de la matriz vegetal a través del uso de pulsos de vacío. Castro et al. (1998a,b) estudiaron la influencia del régimen de presión (atmosférica, vacío pulsante y vacío) sobre la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de ananá, aplicando la técnica de superficie de respuesta para procesar los resultados. En el mencionado trabajo se lograron los menores valores de pérdida de agua y los mayores valores de ganancia de sacarosa con la aplicación de vacío pulsante. Por otra parte, se demostró que la aplicación de vacío pulsante, respecto del vacío o la presión atmosférica, conlleva al menor consumo energético para obtener el mismo

valor de actividad acuosa de la fruta. En dicho trabajo se aplicó un solo pulso de 5 minutos al inicio del proceso.

A partir de lo antes expuesto, se considera factible la aplicación del vacío pulsante en vistas de definir las condiciones óptimas de deshidratación osmótica del ananá, teniendo en cuenta la variación de sus propiedades mecánicas (textura) y la velocidad en la transferencia de masa.

En esta etapa del trabajo se pretende analizar el efecto de la intensidad y duración del pulso de vacío inicial sobre la velocidad de ganancia de soluto y pérdida de agua durante la deshidratación osmótica en solución de sacarosa, como así también su efecto sobre las propiedades mecánicas y la composición química de medias rodajas de ananá y aplicar la segunda Ley de Fick de la difusión para predecir cuantitativamente la transferencia de masa.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Preparación de la muestra**

Se trabajó con frutas de *Ananas Comosus variedad Cayena Lisa* en grado de madurez comercial y textura aún firme, obtenida en locales comerciales. Las frutas fueron lavadas con abundante agua, peladas manualmente y cortadas en medias rodajas de  $0.6 \pm 0.05$  cm de espesor y  $11.5 \pm 0.5$  cm de diámetro; con un sacabocados se les retiró el centro.

Debido a que existe variación en el contenido de algunos nutrientes entre la base y la parte superior de la fruta (Miller & Hall, 1953), se descartaron los extremos utilizándose la parte media del ananá con el objetivo de disminuir la variabilidad natural del tejido.

### **2.2 Determinación de humedad, acidez, pH y sólidos solubles**

La metodología fue descrita en el *Capítulo III: Deshidratación Osmótica*

### **2.3 Condiciones de deshidratación osmótica**

La deshidratación osmótica (DO) se realizó con solución hipertónica de sacarosa de 60 °Brix y 40 °C. El volumen de la solución fue suficiente para garantizar constancia en la concentración de azúcar durante todo el proceso (relación masa jarabe/masa de fruta mayor que 15/1). Para cada ensayo se preparó solución fresca de sacarosa.

El equipamiento utilizado para los tratamientos de DO es el que se muestra en la Figura IV.1. La velocidad de flujo de la solución de sacarosa fue de 2.5 m<sup>3</sup>/h. Se aplicaron siete condiciones de operación diferentes:

Tratamiento 1: presión atmosférica normal;

Tratamiento 2: pulso de vacío (100 mbar por 5 minutos) y presión atmosférica normal hasta el final del proceso;

Tratamiento 3: pulso de vacío (250 mbar por 5 min.) y presión atmosférica normal;

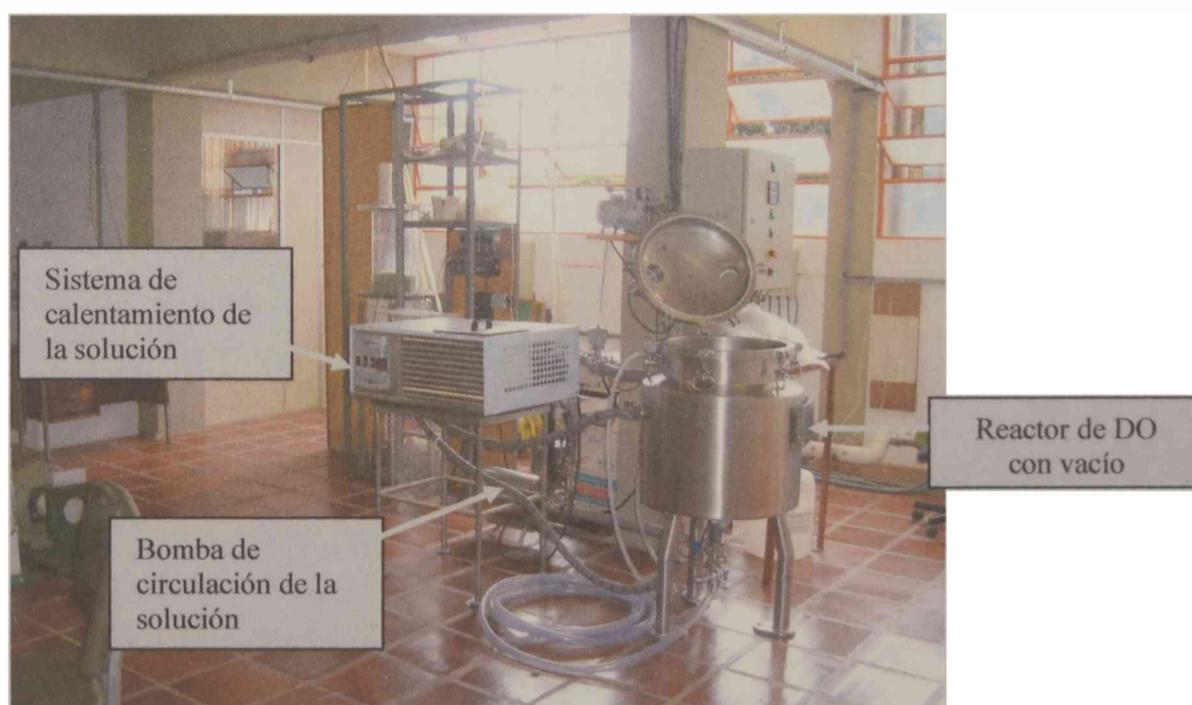
Tratamiento 4: pulso de vacío (100 mbar por 15 min.) y presión atmosférica normal;

Tratamiento 5: pulso de vacío (250 mbar por 15 min.) y presión atmosférica normal;

Tratamiento 6: pulso de vacío (100 mbar por 25 min.) y presión atmosférica normal;

Tratamiento 7: pulso de vacío (250 mbar por 25 min.) y presión atmosférica normal.

El proceso de deshidratación se realizó por inmersión de canastos de acero inoxidable de malla abierta, conteniendo una muestra (cuyo peso se registró previamente) en cada uno, en la solución de sacarosa a temperatura constante y con agitación por recirculación.



**Figura IV.1.** Equipamiento utilizado para la deshidratación osmótica

A cada tiempo (30, 60, 120, 180, 240 y 300 minutos) se extrajeron 4 canastos, se enjuagó cada muestra con agua desmineralizada a 8 °C durante 3-5 segundos con el propósito de quitar el jarabe adherido a la superficie y el exceso de agua superficial proveniente de esta última etapa se eliminó con papel tissue. Se registró el peso de cada muestra y se midió el

espesor. Posteriormente, estas frutas procesadas se fraccionaron para evaluar sus propiedades mecánicas y cuantificar contenido de humedad, acidez, pH, vitamina C y sólidos solubles en fase líquida (°Brix).

#### **2.4 Transferencia de masa. Procedimiento de cálculo**

La pérdida de masa, la ganancia de azúcar y la pérdida de agua fueron calculadas utilizando valores del contenido de humedad y medidas gravimétricas de las muestras a diferentes tiempos de procesamiento, bajo la suposición de que los solutos presentes en la fruta no difunden hacia la solución de sacarosa.

La reducción de peso ( $\Delta M$ ) al tiempo  $t$  se define como la pérdida de masa de la muestra de fruta en ese período de tiempo sobre la masa inicial de dicha muestra, respecto a 100 g de fruta fresca:

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_t}{M_0} 100 \quad (IV.1)$$

La pérdida de agua ( $\Delta M_w$ ) al tiempo  $t$  se define como la pérdida de agua de la muestra de fruta en ese período de tiempo sobre la masa inicial de dicha muestra, respecto a 100 g de fruta fresca:

$$\Delta M_w = \frac{M_0 X_0 - M_t X_t}{M_0} 100 \quad (IV.2)$$

La ganancia de azúcar ( $\Delta M_s$ ) al tiempo  $t$  se define como el aumento de sacarosa en la muestra de fruta en ese período de tiempo, calculado en base a la variación del peso total y a la pérdida de agua:

$$\Delta M = \Delta M_w - \Delta M_s \quad (IV.3)$$

Donde  $M_0$  es la masa inicial de la muestra (kg);  $M_t$  es la masa de la muestra deshidratada durante un período de tiempo  $t$  (kg);  $X_0$  es la humedad inicial de la muestra de fruta (kg de agua/kg de fruta);  $X_t$  es el contenido medio de humedad en la fruta procesada durante un período tiempo  $t$  (kg de agua/kg de fruta deshidratada)

#### **2.5 Modelo de transferencia de masa**

Asumiendo que el producto es un material sólido y homogéneo, con contenido inicial uniforme de agua y de sacarosa y cuya geometría se asimila a una placa plana infinita de espesor  $e$ , basado en el tamaño y forma de las muestras utilizadas, se modeló la

transferencia de masa como un fenómeno de difusión unidimensional, con resistencia externa a la transferencia de masa despreciable y volumen constante, que puede describirse con la Segunda Ley de Fick de la difusión, cuya solución se expresa (Crank, 1975) de acuerdo a las Ecuaciones III.3 y III.4:

En el presente capítulo se utiliza el primer término de la solución analítica y la concentración en la superficie de la fruta se considera igual a la concentración en el equilibrio. La calidad del ajuste del modelo se estimó a través del error promedio porcentual.

Una descripción más detallada del modelo se presentó en el *Capítulo III: Deshidratación Osmótica*.

## **2.6 Evaluación de la textura**

Las propiedades mecánicas de la fruta fresca y deshidratada se evaluaron a través de ensayos de compresión uniaxial de cilindros de ananá de 22 mm de diámetro y altura variable con la humedad de la fruta (de 3 a 6 mm), utilizándose a tal fin un Texturómetro Universal (TA-XT2i Texture Analyser). La metodología fue descrita en el *Capítulo III: Deshidratación Osmótica*.

## **3. Resultados y discusión**

### **3.1 Transferencia de masa**

La masa de las medias rodajas de ananá disminuyó de modo regular durante los procesos de deshidratación y, aunque no se encontraron diferencias significativas entre los resultados de  $\Delta M$  obtenidos con los diferentes tratamientos, se observó que la velocidad de pérdida de masa fue mayor en los procesos con pulso de vacío de 250 mbar (Figura IV.2). Estas diferencias se incrementan con el tiempo de procesamiento. Cada símbolo representa el valor medio de cuatro medidas. Los resultados obtenidos por Escriche et al. (2000) mostraron que las diferentes condiciones de presión (atmosférica y vacío pulsante de distinta duración) no ejercen influencia en la transferencia total de masa, durante la deshidratación osmótica de kiwi, lo que fue atribuido por los autores a la baja porosidad de esta fruta.

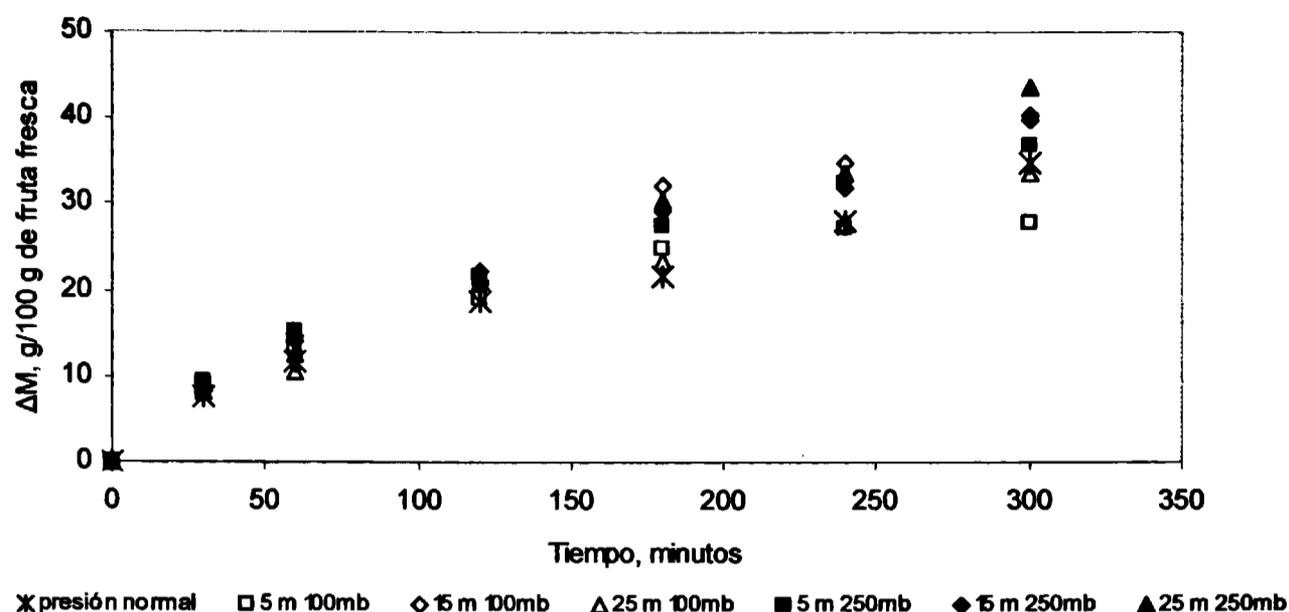


Figura IV. 2. Pérdida de masa ( $\Delta M$ ) de medias rodajas de ananá durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

Las Figuras IV.3 y IV.4 muestran la pérdida de agua y ganancia de azúcar durante los diferentes tratamientos. Los resultados a tiempos cortos de proceso indican que en las condiciones de operación, 60 °Brix y 40 °C, la pérdida de agua es independiente del tratamiento. A mayor tiempo de deshidratación (5 h) la pérdida de agua fue más importante en los procesos con pulso de vacío de 250 mbar. Sin embargo, Shi et al. (1995) encontraron un efecto más evidente de los pulsos de vacío (5 minutos a 100 mbar y 25 minutos a presión normal, en forma reiterativa durante todo el proceso) sobre la pérdida de agua durante la deshidratación de ananá a 40 °C y 65 °Brix. Esta discrepancia en los resultados puede asignarse a que las condiciones de vacío aplicadas en el presente trabajo (un único pulso de vacío inicial) generan una componente menor de flujo hidrodinámico y prevalece la transferencia de agua por mecanismos difusionales.

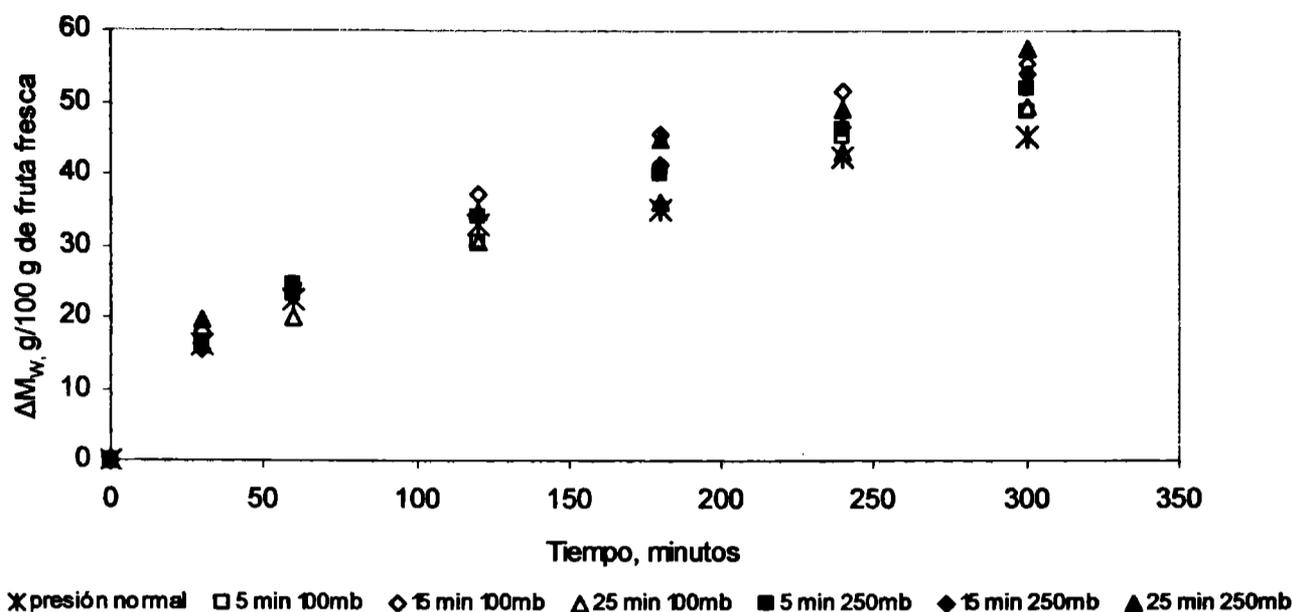


Figura IV.3. Pérdida de agua ( $\Delta M_w$ ) en medias rodajas de ananá durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

La ganancia de soluto se midió como el aumento en gramos de azúcar por 100 gramos de fruta fresca. Se observó una alta velocidad de ganancia de soluto durante los primeros 60 minutos de inmersión seguida de una etapa de baja velocidad. Durante un primer período de inmersión de 3 horas no se observaron diferencias entre los resultados obtenidos con los distintos tratamientos (Figura IV.4). En los subsiguientes períodos de inmersión (4 y 5 horas) la ganancia de soluto fue menor en los procesos de deshidratación osmótica con pulsos de vacío de 250 mbar. En el mismo sentido, Chafer et al. (2003) demostraron que no existe una relación directa entre el grado de impregnación y la duración del pulso de vacío, al estudiar impregnación de cáscaras de cítricos para el desarrollo de alimentos de alto contenido de azúcar.

Un propósito habitual de la deshidratación osmótica es quitar el agua del tejido vegetal con la mínima impregnación de soluto osmoactivo. Los resultados de este estudio indicaron que la velocidad de ganancia de soluto en comparación con la pérdida de agua es inferior en los tratamientos con pulsos de vacío de 250 mbar respecto a la DO a presión atmosférica (Tabla IV.1).

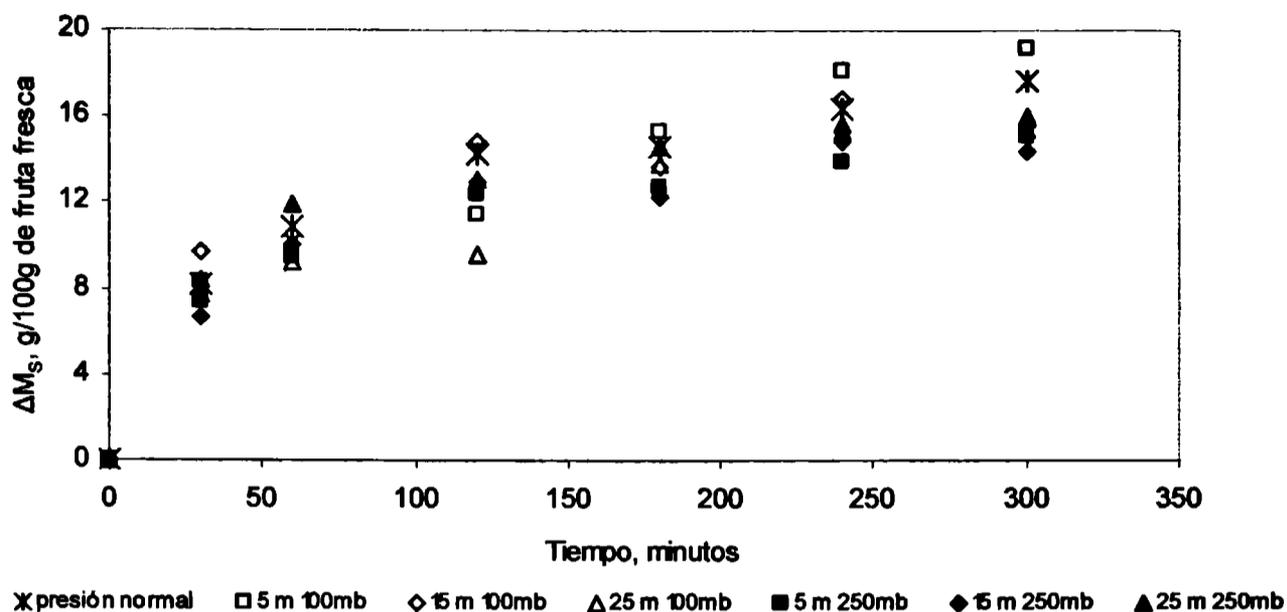


Figura IV.4. Ganancia de soluto ( $\Delta M_s$ ) en medias rodajas de ananá durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

En la Figura IV.5 se muestra la variación de la humedad de las muestras de ananá durante los diferentes procesos de deshidratación osmótica. Puede observarse aquí que aún cuando existe una gran dispersión en los valores medidos en diferentes frutas (entre 500 y 800 gramos de agua por 100 gramos de masa seca), estos valores se van uniformando en la medida que avanza el proceso de deshidratación. A los 60 minutos de inmersión en solución de sacarosa no se aprecian diferencias en los valores de humedad, con muestras de diferentes frutas sometidas a diferentes condiciones de operación. Cabe recordar que en la masa seca se incluyen las sustancias no volátiles a 100 °C originalmente contenidas en la fruta más la masa de sacarosa de la cual se impregna la fruta, de ahí los bajos valores de humedad aún cuando la pérdida de agua no sea tan importante.

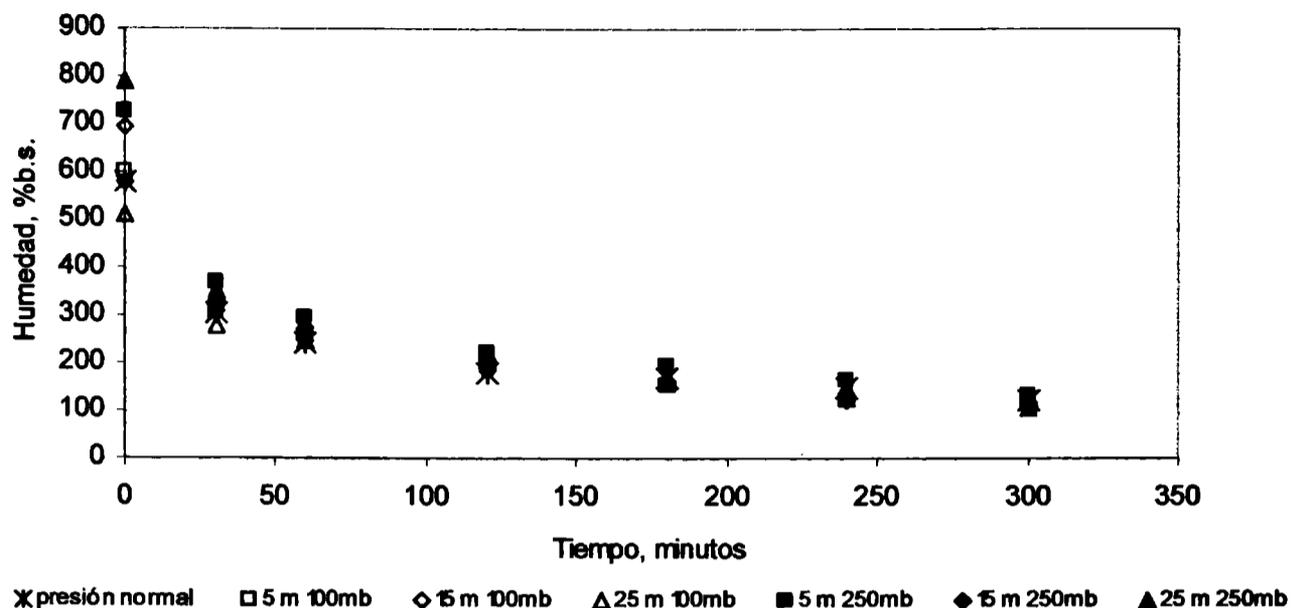


Figura IV.5. Valores de humedad (g de agua en 100g de masa seca) en medias rodajas de ananá durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

Por otra parte, el contenido de sólidos solubles en la fase líquida del tejido de ananá, después de 5 horas de inmersión en solución de sacarosa, alcanzó un valor medio de  $42.45 \pm 1.37$  °Brix y no fue afectado por las condiciones del tratamiento. Estos resultados coinciden con los publicados por Talens et al. (2002) para deshidratación osmótica de kiwi. En la Figura IV.5 se presentan los resultados obtenidos con tres tratamientos diferentes, a modo ilustrativo

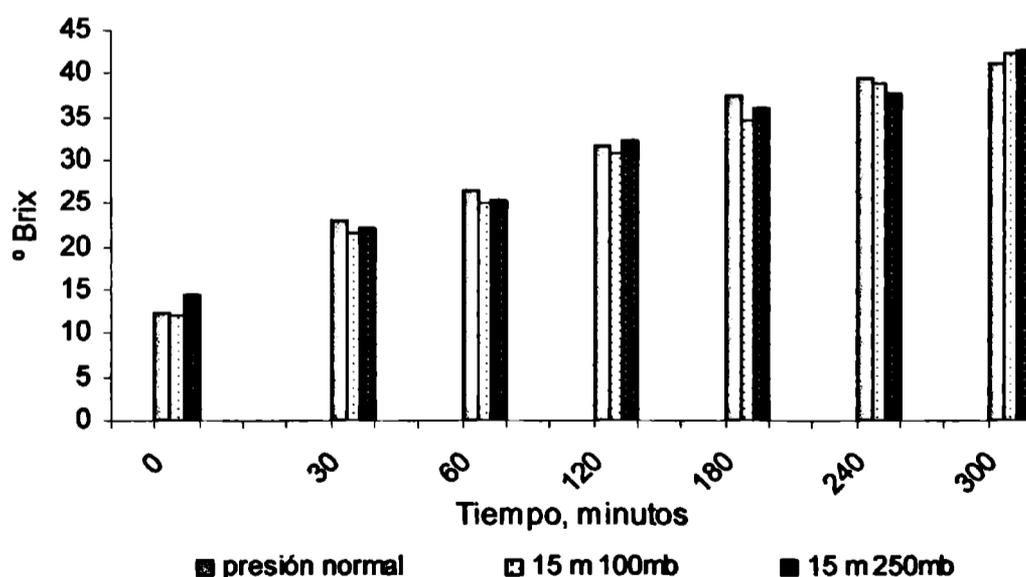
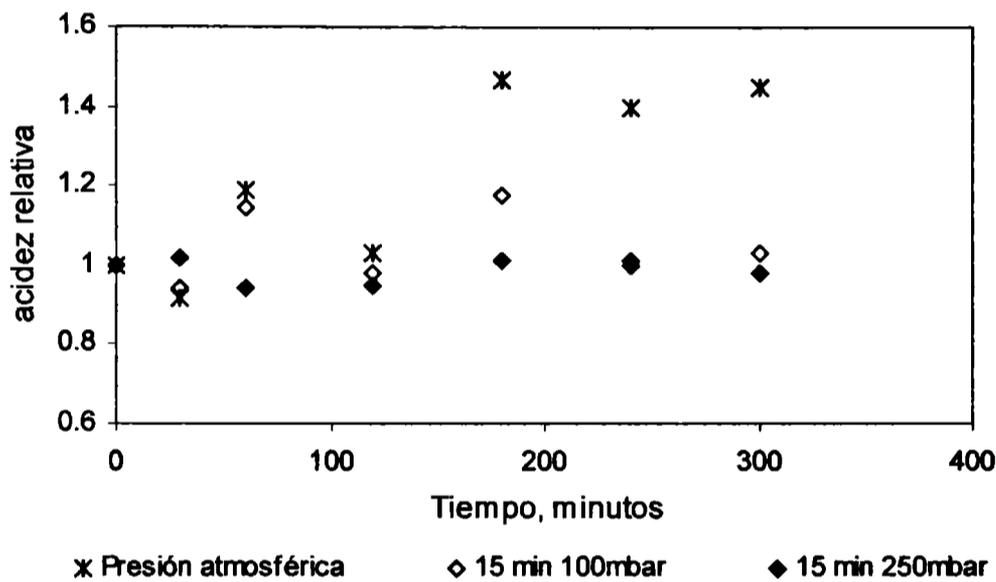


Figura IV.6. Evolución del contenido de sólidos solubles en ananá durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

Los valores de acidez total, en g de ácido cítrico por 100 g de fruta, presentan un leve incremento durante la DO a presión atmosférica y se mantienen sin cambios durante los

procesos con vacío pulsante. El incremento observado podría deberse a la concentración generada por la DO, en tanto que la DO con pulso de vacío es un proceso de “impregnación” mas que de “concentración”. Cabral Brandao et al. (2003) también registraron aumento en los valores de acidez total durante la deshidratación osmótica de mangos a presión atmosférica.

Los resultados de las medidas de acidez total, expresados en forma relativa al valor inicial:  $AR = C_{At}/C_{A0}$ , donde  $C_{A0}$  es el contenido de medio de acidez en el ananá fresco (g de ácido cítrico/100 g ananá fresco);  $C_{At}$  es el contenido de medio de acidez en el ananá deshidratado durante un tiempo t (g de ácido cítrico/100 g ananá), son presentados en la Figura IV.7.



**Figura IV.7.** Valores de acidez total, expresados en forma relativa al valor en la fruta fresca del mismo lote, durante diferentes tratamientos de deshidratación osmótica.

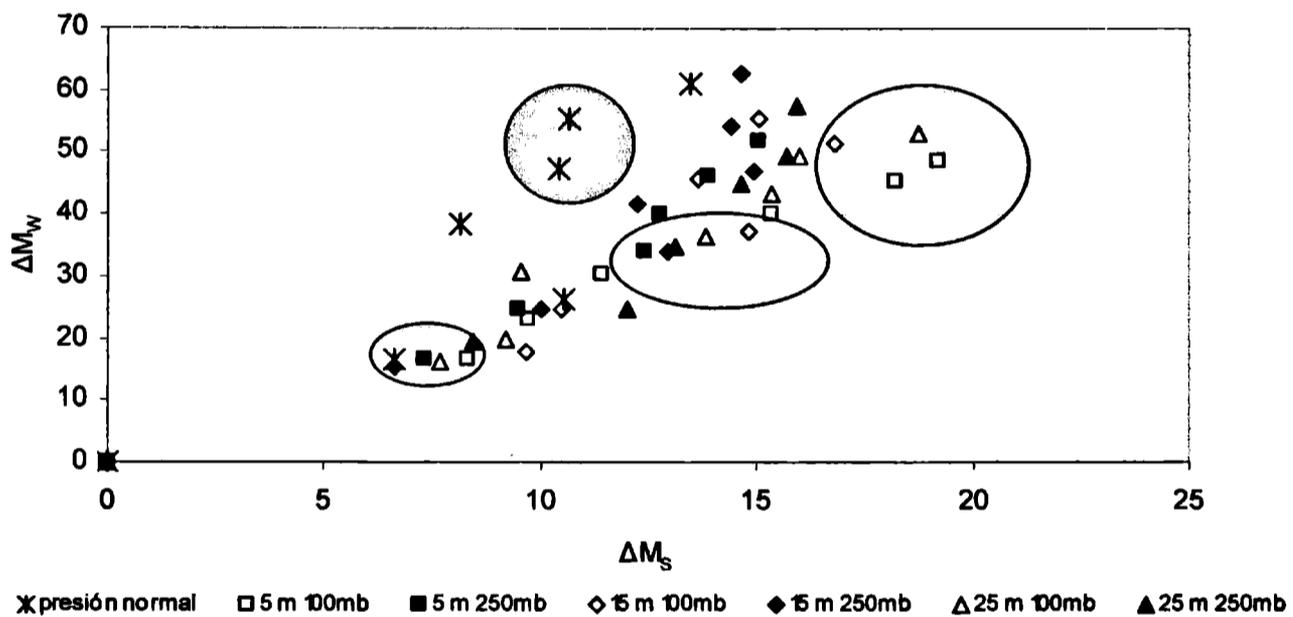
El pH se mantiene prácticamente sin cambios o muestra un leve aumento durante los procesos de DO, aunque, de igual modo que con los valores del contenido de sólidos solubles en fase líquida del fruto (°Brix), no se observó influencia de la presión de operación en los valores de este parámetro. Estos resultados son coherentes con los registrados en la literatura durante la DO de otras frutas: en bananas (Gaspareto et al., 2004); en manzanas (Goularte et al., 2000) y en duraznos (Galli et al., 1996).

### 3.2 Relación entre las condiciones de operación y la optimización del proceso

La influencia de las variables del proceso (aplicación, duración e intensidad del pulso de vacío y tiempo de procesamiento) se pueden analizar en función a la relación de la ganancia

de sacarosa ( $\Delta M_S$ ) y la pérdida de agua ( $\Delta M_W$ ), debido a que distintas relaciones de estos flujos de materia darán como resultado productos de características diferentes. Es así que las condiciones óptimas del proceso pueden estar definidas por las características del producto.

Se seleccionaron cuatro situaciones en términos de las relaciones pérdida de agua-ganancia de soluto (Tabla IV.1): baja pérdida de agua-baja ganancia de soluto ( $L_W L_S$ ); alta pérdida de agua-baja ganancia de soluto ( $H_W L_S$ ); baja pérdida de agua-alta ganancia de soluto ( $L_W H_S$ ) y alta pérdida de agua-alta ganancia de soluto ( $H_W H_S$ ). Estas situaciones extremas están vinculadas con las condiciones del tratamiento osmótico, como se muestra en la Figura IV.8.



**Figura IV. 8.** Datos de ganancia de sacarosa versus pérdida de agua para diferentes condiciones de procesamiento. Los círculos coloreados encierran prototipos de características específicas.

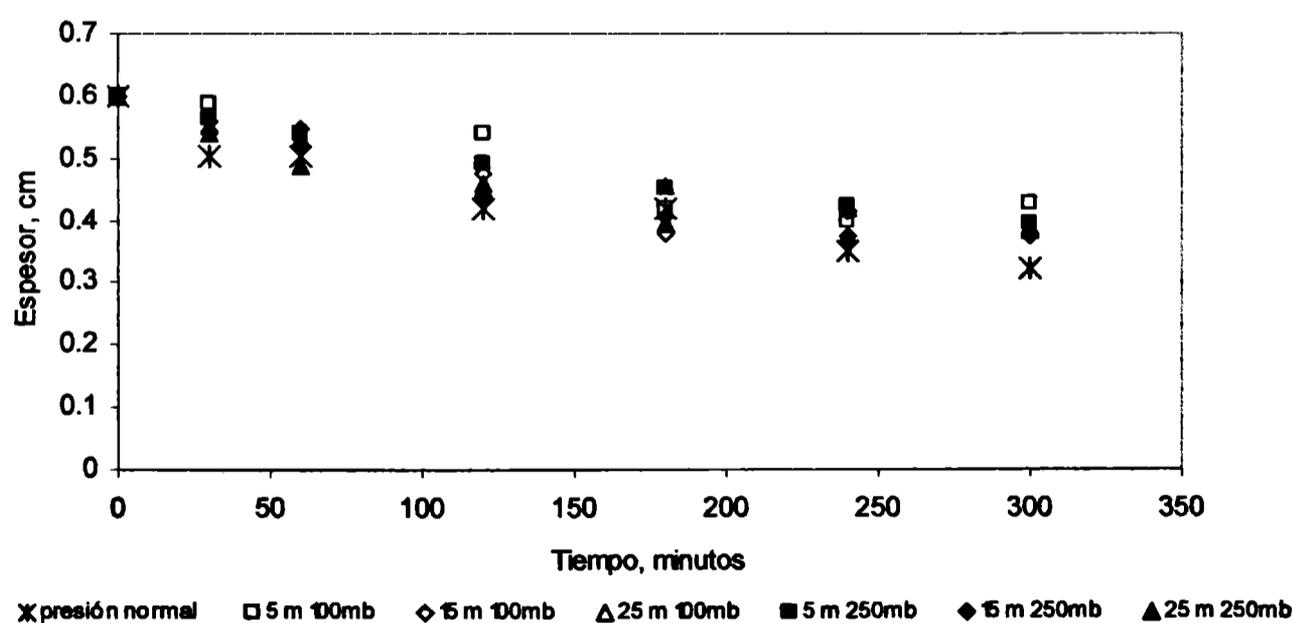
En períodos cortos de procesamiento los resultados son independientes del tratamiento aplicado: baja ganancia de soluto y baja pérdida de agua ( $L_W L_S$ ). Por el contrario, si se busca alta ganancia de soluto y alta pérdida de agua ( $H_W H_S$ ) se requiere un período de inmersión prolongado y aplicación de pulsos de vacío de intensidad intermedia (100 mb). La duración de los pulsos de vacío no afectó los resultados buscados en este análisis.

**Tabla IV. 1.** Prototipos seleccionados y condiciones de procesamiento asociadas, (referidos a la Figura IV.8).

Prototipo	Presión de operación	Tiempo de procesamiento
HwHs	pulsos de 100mb	4 h de DO
HwLs	atmosférica	4 h de DO
LwHs	pulsos de 100mb	2-3 h de DO
LwLs	todos	cortos tiempos

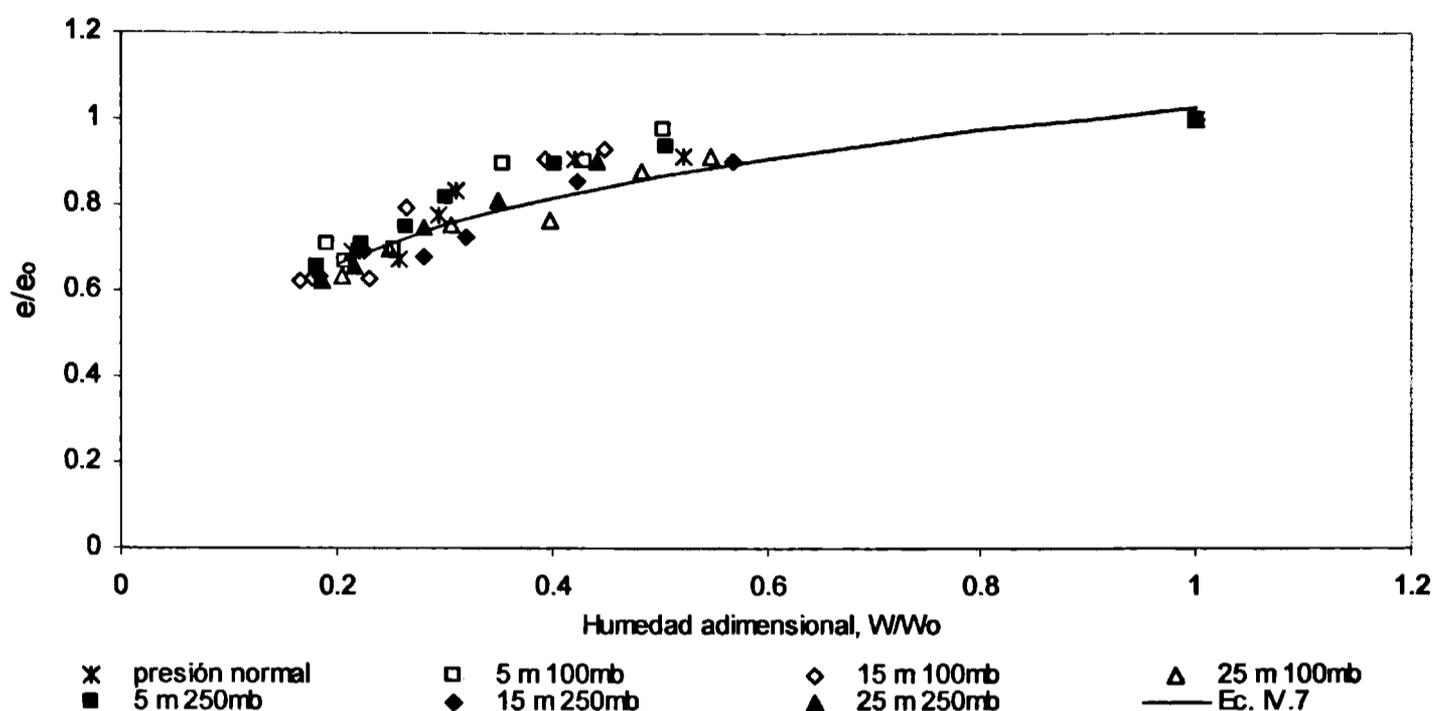
### 3.3 Variación del espesor

La variación del espesor con el tiempo de procesamiento fue individualmente estudiada para cada condición de proceso (presión normal y diferentes tiempos y valores de vacío pulsante). Los valores medios de los resultados de las mediciones para cada condición se presentan en la Figura IV.9. En esta Figura se observa que el encogimiento de la fruta presenta un comportamiento lineal con el tiempo de inmersión en la solución de sacarosa y que este comportamiento es independiente de la condición del proceso. La evaluación estadística que corrobora esta observación indica que los valores de las pendientes de estas líneas rectas (no presentadas en la figura para no enmascarar los valores experimentales) están comprendidos dentro de un rango de  $-0.0007$ ,  $r^2=0.88$ , (5 minutos 250mb y 5 minutos 100mb) y  $-0.0011$ ,  $r^2=0.91$ , (25 minutos a 250m). La pendiente de las medidas obtenidas en los ensayos a presión normal fue de  $-0.001$ , con un  $r^2=0.82$ .



**Figura IV. 9.** Variación del espesor con el tiempo de inmersión durante la deshidratación osmótica en diferentes condiciones de presión.

Como puede apreciarse en la Figura IV.9, existe una disminución del espesor de aproximadamente el 35 % cuando la humedad (medida en gramos de agua por 100 gramos de masa seca) disminuye un 80 % de su valor inicial.



**Figura IV.10.** Variación de  $S_v$  de rodajas de ananá durante la deshidratación osmótica en diferentes condiciones de operación como una función de  $W/W_0$ . Los símbolos representan los datos experimentales y la línea continua los valores calculados con la Ecuación IV.7.

Debido a que el encogimiento se debe principalmente a la pérdida de agua durante el proceso de deshidratación, es más representativo relacionar los resultados experimentales de la variación del espesor con la variación del contenido de agua de la fruta. De esta manera, los datos experimentales de encogimiento de las medias rodajas de ananá durante la deshidratación fueron ajustados a diferentes modelos estadísticos, a los efectos de distinguir el modelo empírico que mejor describa la relación del encogimiento con la variación de humedad durante la deshidratación de la fruta.

La dependencia del factor de volumen ( $S_v=e/e_0$ ) con el contenido de agua adimensional ( $W/W_0$ ) se presenta en la Figura IV.10.

El modelo de variación lineal del espesor con el  $\ln(W/W_0)$  es el que muestra mejor ajuste a estos datos para cada condición de procesamiento:

$$S_v = e/e_0 = 1.026 + 0.227 \cdot \ln(W/W_0) \quad (IV.7)$$

Posteriormente, se compararon los valores de pendiente y ordenada al origen, a  $\ln(W/W_0)=0$ , para las siete rectas resultantes. Se encontró que existe una importante

superposición en los límites de confianza de las ordenadas al origen y de las pendientes, indicando que no hay diferencias entre ellas, como puede verse en la Tabla IV.2. Por esta razón en la Ecuación IV.7 figuran los valores promedios de la ordenada al origen y de la pendiente.

**Tabla IV. 2.** Parámetros de la ecuación de predicción del encogimiento (Ecuación IV.7) para cada condición individual del proceso de deshidratación.

Condición de procesamiento	Pendiente	Ordenada	$r^2$
presión normal	0.217	1.0321	0.859
5 min 100mb	0.222	1.0324	0.839
15 min 100mb	0.239	1.0226	0.863
25 min 100mb	0.236	1.0234	0.952
5 min 250mb	0.211	1.0243	0.925
15 min 250mb	0.231	1.0158	0.955
25 min 250mb	0.231	1.0354	0.946
Promedio	0.227	1.0266	
Desvío estándar	0.0103	0.00695	

### 3.4 Coeficientes de difusión

**Tabla IV.3.** Coeficientes de difusión aparente del agua y de sacarosa, durante distintos tratamientos de DO de ananá, calculados con espesor cosntante

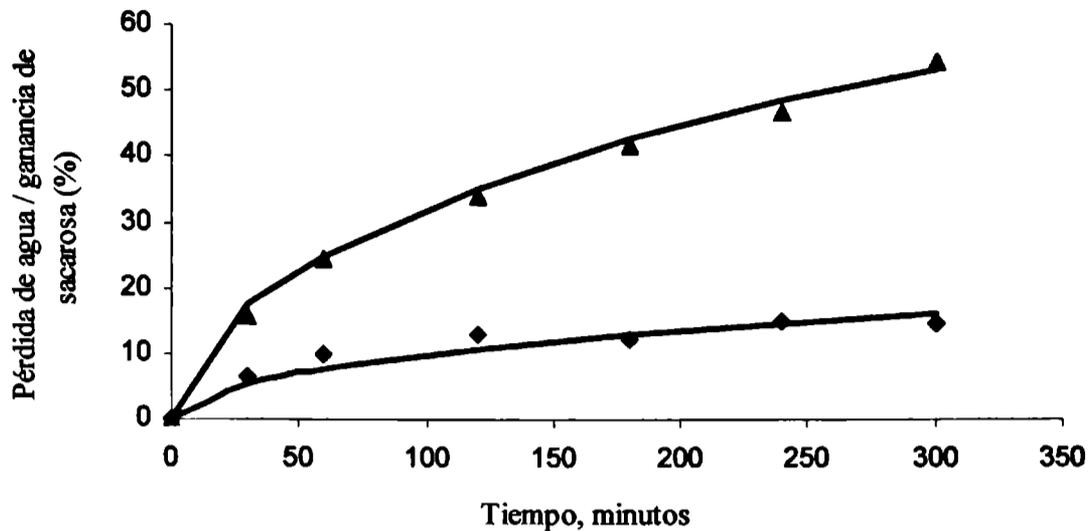
Condiciones del proceso	Coeficiente de difusión x $10^{11}$ ( $m^2 s^{-1}$ )			
	$D_{wef}$	Epp (%)	$D_{sef}$	Epp (%)
Presión atmosférica	24 ± 3	6.3	2.3 ± 0.5	6.9
5 minutos 100 mbar	23 ± 2	2.3	9.7 ± 1	3.4
15 minutos 100 mbar	30 ± 4	2.2	6.2 ± 3	12.8
25 minutos 100 mbar	22 ± 3	4.2	6.3 ± 2	9.4
5 minutos 250 mbar	25 ± 3	2.4	11 ± 1	5.6
15 minutos 250 mbar	27 ± 5	4.1	5.8 ± 1	7.3
25 minutos 250 mbar	32 ± 3	4.8	5.1 ± 0.8	9.2

Datos de pérdida de agua, experimental y predicha con las Ecuaciones IV.4 y IV.5, durante el proceso de deshidratación osmótica de ananá con pulso de vacío inicial de 250 mbar durante 15 minutos, se presentan en la Figura IV.11. Los valores del coeficiente de difusión efectivo calculados por ajuste del modelo de Fick a los datos experimentales y del

respectivo  $E_{pp}$  asociado, son mostrados en la Tabla IV.3. Los valores de  $D_{ef}$  a presión atmosférica son comparables con los presentados en la Tabla III.4, a 40 °C. Sin embargo, los valores de los coeficientes que figuran en esa tabla son algo diferentes ( $D_{W_{ef}}=17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ;  $D_{S_{ef}}=16 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). Esto puede deberse a que el desarrollo experimental de esta etapa del trabajo, DO con pulsos de vacío, se realizó en la Universidad Estadual de Campinas, utilizando el equipo de deshidratación osmótica mostrado en la Figura IV.1, diferente al equipamiento utilizado en los ensayos de deshidratación osmótica del Capítulo III. Además, por estar en Campinas, la fruta utilizada pudo presentar características químicas y estructurales con algunas diferencias a las cultivadas en la Provincia de Misiones, aún cuando se cuidó trabajar siempre con la misma variedad de *ananá comosus*. Teniendo en cuenta esta realidad y con el objetivo de evaluar los efectos de la aplicación de pulsos de vacío se efectuaron ensayos a presión atmosférica con el equipamiento de la Figura IV.1.

De los resultados presentados en la Tabla IV.3 se puede observar que la aplicación de pulsos de vacío afecta más la cinética de ganancia de sacarosa que la cinética de pérdida de agua. Por otro lado, la ganancia de sacarosa se ve favorecida por la aplicación de pulsos breves (5 minutos) y no se registran diferencias entre los resultados de ensayos con pulsos de 15 y 25 minutos.

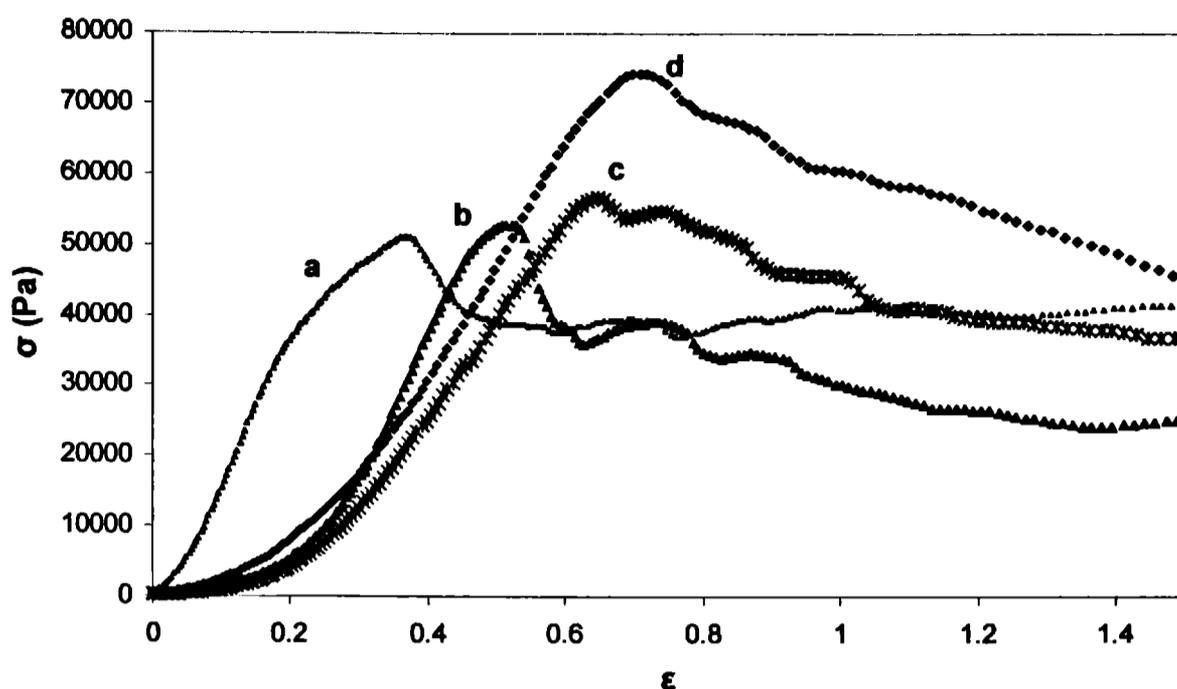
La comparación de los valores de coeficientes de difusión reportados en la literatura es difícil debido a los diferentes métodos de estimación aplicados; no obstante estos valores están en el orden de los reportados por otros autores (Jena & Das, 2005).



**Figura IV. 11.** Comparación entre los resultados teóricos (líneas continuas) y experimentales de la pérdida de agua (▲) y ganancia de sacarosa (◆) durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de ananá, con pulso de vacío de 15 minutos a 250 mbar.

### 3.5 Propiedades mecánicas

Son numerosos los factores que afectan las propiedades mecánicas del tejido celular, entre ellas figuran el contenido de agua, la resistencia de la pared celular y la forma en que están ensambladas la células (Chiralt et al., 2001b). Dependiendo de las propiedades físicas de las muestras, se han descrito dos modos de falla a la compresión: ruptura celular y desligamiento de las células (Chiralt et al., 2001b). La deshidratación osmótica produce cambios en el tejido celular que pueden afectar el mecanismo de falla predominante durante la compresión. Este efecto puede manifestarse a través del comportamiento mecánico del sistema. Así, si se observara un incremento en la deformación a la fractura ( $\epsilon_{HF}$ ) y una disminución en los valores de la tensión de falla ( $\sigma_{HF}$ ) y en el módulo de compresión (E), se podría suponer que el desligamiento celular es el modo de falla preponderante.



**Figura IV.12.** Curvas de compresión características de la fruta fresca (a); con deshidratación a presión atmosférica (b); con pulso de vacío de 25 minutos a 100 mbar (c) y con pulso de vacío de 25 minutos a 250 mbar (d). El tiempo de deshidratación osmótica fue de 300 minutos.

En la Figura IV.12 se presentan curvas de de compresión de ananá fresco y ananá deshidratado a 40 °C y 6 °Brix durante 300 minutos, bajo diferentes condiciones de tratamiento osmótico. El tratamiento osmótico provoca un aumento en los valores de  $\sigma_{HF}$  y  $\epsilon_{HF}$  y una marcada disminución en los valores de la pendiente inicial de la curva, cuyo valor es registrado como módulo de compresión (E), que puede explicarse por la pérdida de turgencia del tejido vegetal. Así, sobre la base de la discusión anterior, el incremento en  $\sigma_{HF}$  indicaría que el tratamiento de DO no genera un desligamiento celular como mecanismo de falla dominante. La literatura presenta diversos resultados del efecto de la aplicación de pulsos de vacío sobre las propiedades mecánicas de diferentes frutas: Chiralt et al. (2001b) y Talens et al. (2002) encontraron que la aplicación de pulsos de vacío no favorece la respuesta mecánica de kiwi durante la deshidratación osmótica; Torres et al. (2006) encontraron similar comportamiento durante el tratamiento de mango a 65 °Brix. Moreno et al. (2000) no observaron efecto significativo en la aplicación de vacío pulsante durante la DO de frutillas, sin embargo Chiralt & Talens (2005) muestran que el efecto del vacío pulsante sobre las características mecánicas de frutillas varía en función de las demás condiciones del proceso.

El modulo de compresión, la tensión y la deformación a la ruptura son propiedades mecánicas asociadas a la firmeza, dureza y elasticidad, respectivamente (Sabadini et al.,

2006). La Figura IV.12 demuestra que la deshidratación osmótica produce una disminución de la firmeza, aumento de la dureza y de la elasticidad de la fruta de ananá.

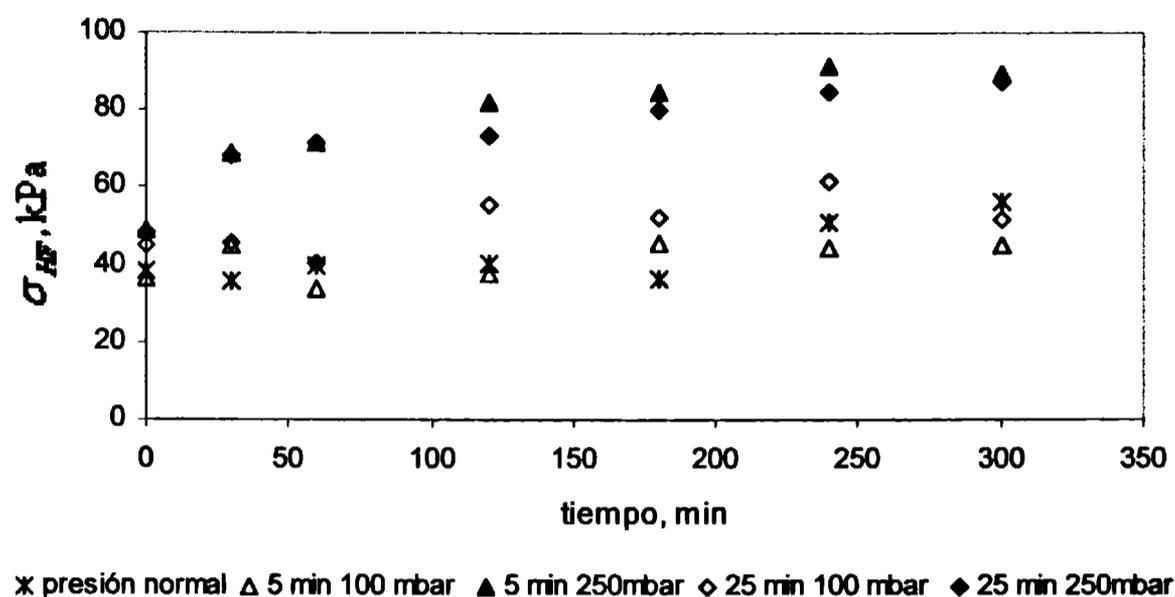
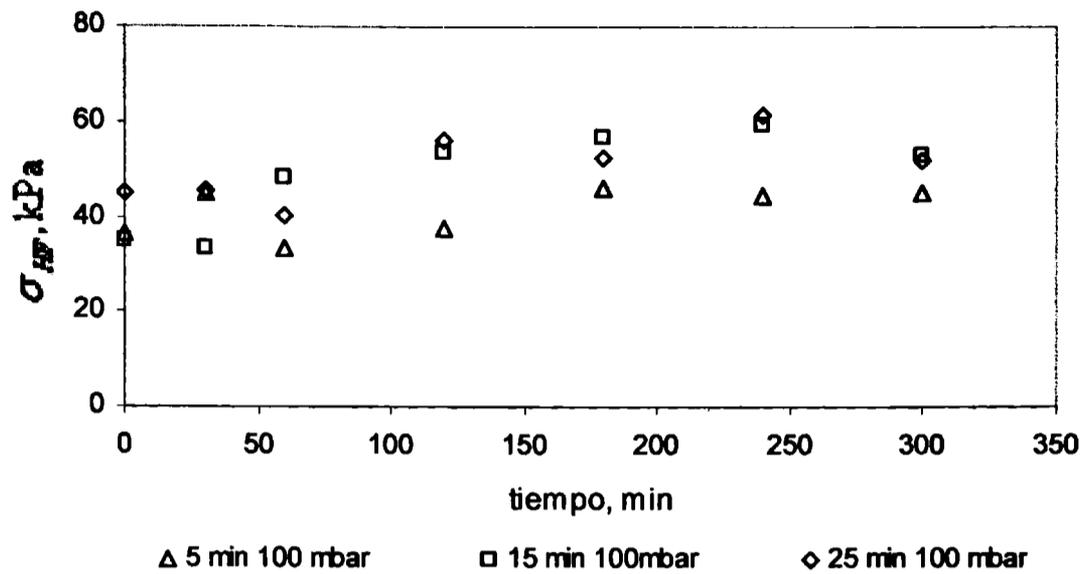


Figura IV.13. Valores de tensión a la fractura durante el proceso de deshidratación osmótica de ananá, bajo diferentes condiciones de operación.

Rodajas de ananá fresco provenientes de diferentes frutas, seleccionadas con similar grado de madurez, mostraron un comportamiento homogéneo de sus propiedades mecánicas  $\sigma_H$  y  $\epsilon_H$ , en tanto que mostraron mayor dispersión los valores del parámetro  $E$  (Tabla III.15.). Esta dispersión de los valores de las propiedades reológicas es propia del tejido vegetal, como ha sido documentado en mango (Torres et al., 2006) y papaya (Rodrigues et al., 2003).

En la Figura IV.13 se muestran los valores de  $\sigma_{Hf}$  medidos en muestras de ananá deshidratado bajo diferentes condiciones de procesamiento, a distintos tiempos. Cada punto es el promedio de cinco medidas diferentes. En todos los casos  $\sigma_{Hf}$  aumenta con el tiempo de deshidratación, aunque esta variación es pequeña durante el proceso a presión atmosférica o con pulso de vacío de 100 mbar. Con pulsos de vacío de 250 mbar se observa un mayor incremento en los valores de este parámetro, no presentándose diferencias entre los resultados obtenidos con pulsos de diferente duración. El efecto de la duración de los pulsos de vacío se aprecia con mayor claridad en la Figura IV.14. Estos datos manifiestan que no aumentaría la firmeza de las muestras de ananá aumentando el tiempo de duración de los pulsos de vacío de 15 a 25 min; una pequeña diferencia se observa entre estos valores y los resultados medidos sobre la fruta procesada con un pulso inicial de 5 minutos.



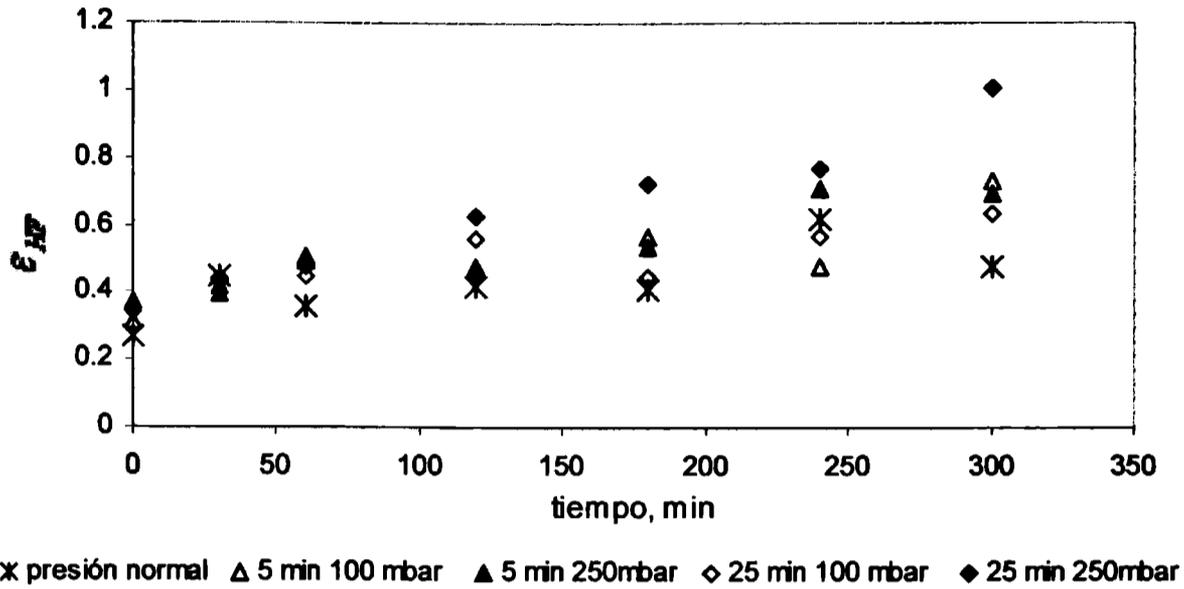
**Figura IV. 14.** Valores de tensión a la fractura durante procesos de deshidratación osmótica de ananá con pulsos de vacío de 100 mbar.

Las observaciones experimentales anteriores pueden ser explicadas en base a que la morfología de los espacios intercelulares afecta las propiedades mecánicas del tejido vegetal (Lewicki & Lukaszuk, 2000). Es posible que pulsos de vacío más drásticos (250 mbar) provoquen un reemplazo más eficiente de los espacios de aire con solución hipertónica, y con ello un efecto de plasmólisis más importante que la ruptura o disrupción molecular, que durante la deshidratación osmótica a presión atmosférica.

De estos resultados se puede concluir que el proceso de deshidratación osmótica de ananá origina una estructura celular igual o más resistente que la fruta fresca y que la aplicación de pulsos de vacío de 250 mbar al proceso acrecienta esta característica.

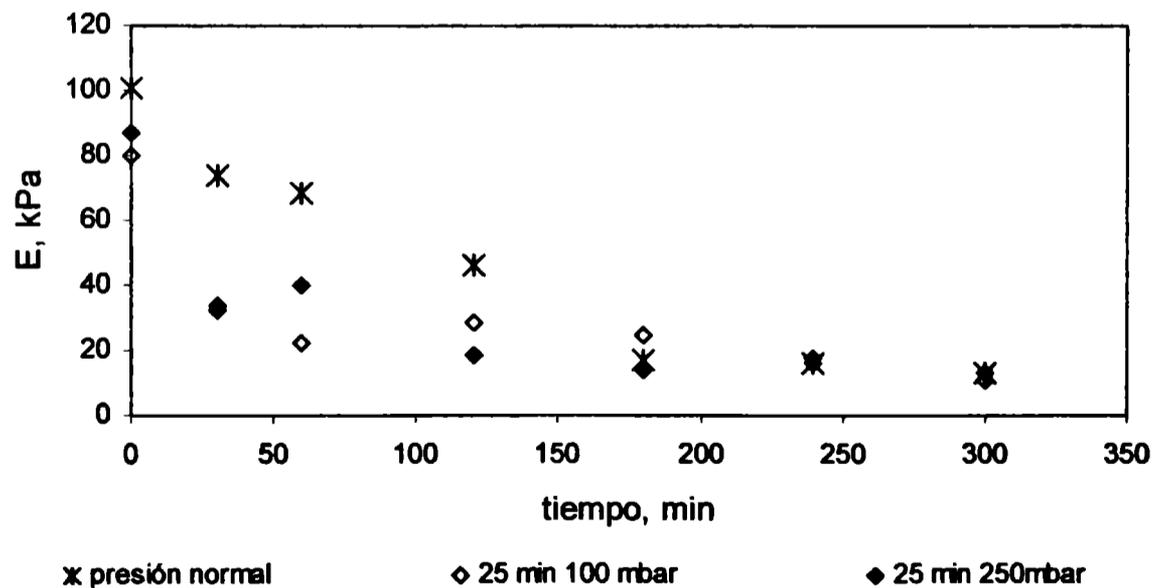
La Figura IV.15 muestra la variación de la deformación a la fractura durante la deshidratación osmótica de ananá y la influencia de las condiciones de operación. En general, la deformación a la fractura se incrementa con el tiempo de deshidratación y este incremento es afectado por las condiciones de operación. Por otra parte, a cortos tiempos de iniciado el proceso de deshidratación los valores de  $\epsilon_{HF}$  de las muestras no varían con el tratamiento osmótico al cual fueron sometidas, pero a partir de las dos horas de deshidratación los valores de este parámetro en las muestras de ananá deshidratadas con pulso de vacío de 250 mbar durante 25 minutos son notoriamente mayores que los medidos en las muestras deshidratadas a presión atmosférica normal. Así, el valor de  $\epsilon_{HF}$  en ananá deshidratado durante 300 minutos aumentó el 80 %, 110 % y 195 % a presión atmosférica,

con pulso de vacío de 25 minutos a 100 mbar y con pulso de vacío de 25 minutos a 250 mbar, respectivamente.



**Figura IV.15.** Valores de deformación a la fractura durante el proceso de deshidratación osmótica de ananá, bajo diferentes condiciones de operación.

La deshidratación osmótica provoca una disminución en el módulo de compresión del ananá (Figura IV.16). Este efecto es más pronunciado en los procesos con pulso de vacío. De esta forma, se podría inferir que existe una mayor pérdida de turgencia durante la primera hora de DO con pulsos de vacío que durante el mismo tiempo de DO a presión atmosférica.



**Figura IV.16.** Variación del módulo de compresión en muestras de ananá durante la deshidratación osmótica, en tres condiciones diferentes de operación.

Debido a la variabilidad de los valores de  $E$  medidos en fruta fresca, los resultados de esta propiedad mecánica durante el proceso se analizaron en relación a los valores de dicha propiedad medidos en la fruta fresca del respectivo batch, es decir, se expresaron en forma relativa al valor inicial ( $E/E_0$ ). La Figura IV.17 muestra que en los primeros tiempos de deshidratación existe una dependencia entre los valores del módulo de compresión  $E$  y tratamiento osmótico, con tendencia a uniformarse con el transcurso del proceso en un valor de aproximadamente el 20 % del inicial.

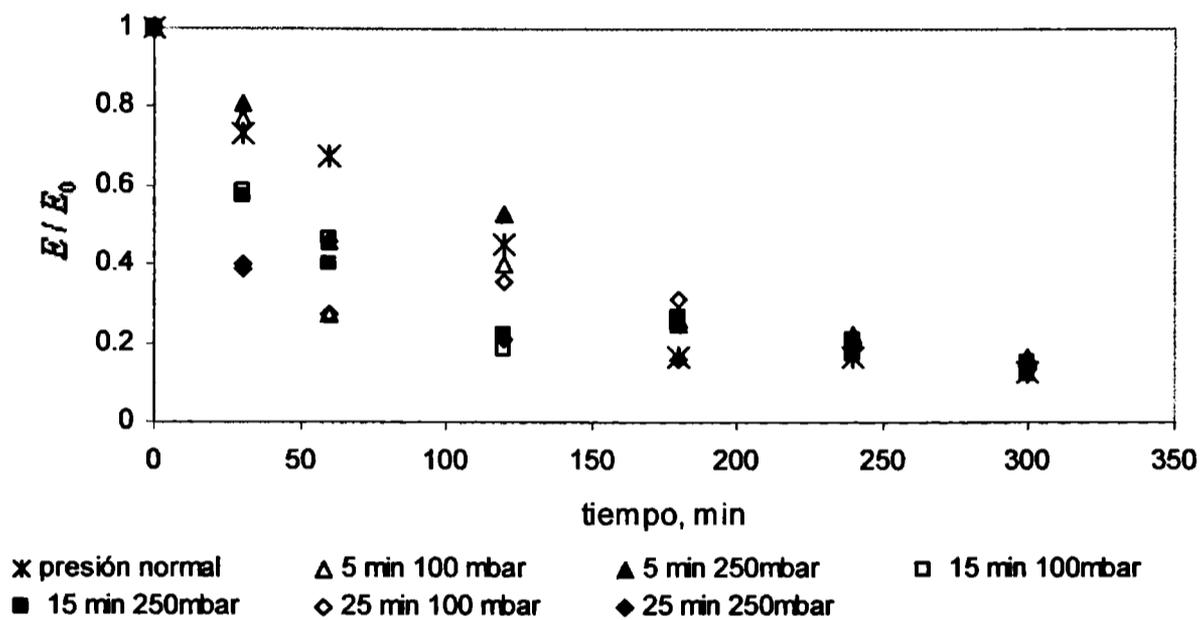


Figura IV.17. Módulo de compresión relativo al valor inicial en ananá durante 5 h de deshidratación osmótica, aplicando diferentes condiciones de operación.

#### 4. Conclusiones

No se observó efecto significativo en la aplicación de vacío pulsante sobre la velocidad de pérdida de agua, respecto de los resultados obtenidos durante la deshidratación a presión atmosférica. Contradictoriamente a lo esperado, no se registró un drástico efecto de “incremento de impregnación” del soluto en la fruta con la aplicación de vacío pulsante durante la DO de ananá.

No obstante, la aplicación de pulsos de vacío de 250 mbar mostró un efecto beneficioso sobre la relación pérdida de agua/ganancia de sacarosa al cabo de 5 horas de deshidratación.

El tiempo de deshidratación osmótica afecta las propiedades mecánicas del ananá. La aplicación de pulsos de vacío aumenta la resistencia a la fractura y favorece la pérdida de

turgencia en los primeros tiempos del proceso de deshidratación. Estos efectos son más drásticos con pulsos de vacío de 250 mbar que con pulsos de 100 mbar. La diferencia de respuesta del sistema a pulsos de 15 y 25 minutos duración de no es clara.

Los valores del encogimiento de las muestras no se vieron afectados por la aplicación de vacío pulsante al proceso de deshidratación. En 300 minutos de inmersión el espesor disminuye en un 35 % en tanto que la humedad (en base seca) disminuye en un 80 % del valor inicial.

## **Bibliografía**

Azoubel, P.; Murr, F. 2004. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering*, 61: 291-295.

Barat, J.; Talens, P.; Barrera, C.; Chiralt, A.; Fito, P. 2002. Pineapple candying at mild temperature by applying vacuum impregnation. *Journal of Food Science*, 67: 3046-3052.

Cabral Brandao, M. C.; Maia, G. A.; Lima, D. P.; Parente, E. J.; Campello, C. 2003. Análise físico-química, microbiológica e sensorial de frutos de manga submetidos a desidratacao osmotic-solar. *Revista Brasileira de Furticultura*, 25: 38-41.

Castro, D.; Fito, P.; Treto, O.; Boys, T.; Nuñez de Villavicencio, M. 1998a. Influencia de la presión y otras variables de proceso en la transferencia de masa de piña deshidratada osmóticamente. Evaluación energética y estimación de costos. II Parte. *La Alimentación Latinoamericana*. 225: 33-39

Castro, D.; Fito, P.; Treto, O.; Boys, T.; Nuñez de Villavicencio, M. 1998b. Influencia de la presión y otras variables de proceso en la transferencia de masa de piña deshidratada osmóticamente. Evaluación energética y estimación de costos. *La Alimentación Latinoamericana*. 224: 50-54.

Chafer, M.; Perez, S.; Chiralt, A. 2003. Kinetics of Solute Gain and Water Loss During Osmotic Dehydration of Orange Slices. *Food Science and Technology International*, 9: 389-396

Chiralt, A.; Fito, P.; Barat, J.; Andrés, A.; González-Martínez, C.; Escriche, I.; Camacho, M. 2001a. Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal of Food Engineering*, 49: 141-151.

Chiralt, A.; Martínez-Navarrete, N.; Martínez-Monzó, J.; Talens, P.; Moraga, G.; Ayala, A.; Fito, P. 2001b. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant effect. *Journal of Food Engineering*, 49: 129-135.

Chiralt, A.; Talens, P. 2005. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67: 167-177.

- Corzo, O.; Bracho, N.; Rodriguez, J.; Gonzalez, M. 2007. Predicting the moisture and salt contents of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 80: 781-790.
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2<sup>nd</sup> edition., Oxford University Press Inc., New York.
- Escriche, I.; García-Pinchi, R.; Andrés, A.; Fito, P. 2000. Osmotic dehydration of kiwifruit (*Actinida chinensis*): fluxes and mass transfer kinetics. *Journal of Food Process Engineering*, 23: 191-205.
- Galli, D.; Bilhalva, A.; Rodrigues, R.; Rodrigues, L. 1996. Influencia da composicao do zarope nas características fisico-químicas de pessegos tipo passa. *Revista Brasileira de Agrociencia*, 2: 179-182.
- Gaspareto, O.; Oliveira, E.; Da Silva, P. 2004. Influencia del Tratamiento Osmótico en el Secado de la Banana "Nanica" (*Musa cavendishii*, L.) en Secador de Lecho Fijo. *Información Tecnológica*, 15: 9-16.
- Giraldo, G.; Talens, P.; Fito, P.; Chiralt, A. 2003. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering*, 58: 33-43.
- Goularte, V.D.S.; Antunes, E.C.; Antunes, P.L. 2000. Qualidade de maçã Fuji osmoticamente concentrada e desidratada. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 20: 160-163.
- Jena, S.; Das, H. 2005. Modelling for moisture variation during osmo-concentration in apple and pineapple. *Journal of Food Engineering*, 66: 425-432
- Khin, M.; Zhou, W.; Perera, C. 2006. A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 77: 84-95.
- Lewicki, P.P.; Lukaszuk, A. 2000. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering*, 45: 119-126.
- Miller, E.; Hall, G. 1953. Distribution of Total Soluble Solids, Ascorbic Acid, Total Acid, and Bromelin Activity in the Fruit of the Natal Pineapple (*Ananas Comosus* L. Merr.). *Plant Physiology*; 28: 532-534.
- Moreno, J.; Chiralt, A.; Escriche, I.; Serra, J.A. 2000. Effect of blanching/osmotic dehydration combined methods on quality and stability of minimally processed strawberries. *Food Research International*, 33: 609-616.
- Rastogi, N.; Raghavarao, K. 1996. Kinetics of osmotic dehydration under vacuum. *Lebensmittel-Wissenschaft und – Technologie*, 29: 669-672.
- Rodrigues, A.; Cunha, R.; Hubinger, M. 2003. Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering* 59: 129-135.
- Sabadini, E.; Hubinger, M.D.; Cunha, R.L. 2006. The effects of sucrose on the mechanical properties of acid milk proteins-kappa-carrageenan gels. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 23: 55-65.

Shi, X.; Fito, P. 1994. Mass transfer in vacuum osmotic dehydration of fruits: a mathematical model approach. *Lebensmittel-Wissenschaft und – Technologie*, 27: 67–72.

Shi, X.; Fito, P.; Chiralt, A. 1995. Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Food Research International*, 28: 445-454.

Talens, P.; Martínez-Navarrete, N.; Fito, P; Chiralt, A. 2002. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3: 191-199.

Torres, J.; Talens, P.; Escriche, I.; Chiralt, A. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 74: 240–246.

## **Capítulo V**

### **Dehidrocongelación**

## **Resumen**

El objetivo de esta etapa fue analizar la influencia de diferentes niveles de pre-deshidratación osmótica y con aire caliente, seguida por una etapa de congelación, sobre la calidad final de la fruta, a través del grado de exudado y la firmeza de las rodajas de ananá después del descongelado. Por otra parte se analizó el efecto de un proceso de congelación lento (la condición más desfavorable) sobre el contenido de ácido ascórbico.

En base a los resultados obtenidos en las etapas previas de deshidratación osmótica a presión atmosférica y con vacío pulsante, principalmente aquellos relacionados a la cinética de transferencia de masa, pérdida de vitamina C y cambios en las propiedades mecánicas, se seleccionó la condición de deshidratación osmótica a presión atmosférica y 40 °C de temperatura para desarrollar el presente estudio de dehidrocongelación de ananá. Las temperaturas de secado seleccionadas como pre-tratamiento al proceso de congelación fueron: 45, 60 y 75 °C.

## **1. Introducción**

La congelación de alimentos es un proceso que ha sido desarrollado y aplicado con el objetivo de preservar la calidad de los productos, especialmente cuando se trata de almacenamiento por un largo período de tiempo. El proceso de dehidrocongelación es una variante de la congelación, en el cual el alimento es parcialmente deshidratado y luego congelado (Robbers et al., 1997; Torregiani et al., 1999; Marani et al. 2007). La preservación de frutas tropicales mediante un proceso adecuado de congelación permitiría mantener una distribución constante durante todo el año, abastecer regiones distantes a precios razonables y desarrollar nuevos productos.

Cuando se busca conservar las características originales de las frutas, la congelación es el método de preservación más apropiado. No obstante, el proceso de congelación-descongelación causa severos cambios en las propiedades físicas y químicas de los alimentos de alto contenido de agua, como las frutas; estos cambios afectan directamente las características estructurales de los mismos debido, en la mayoría de los casos, a daños en la membrana plasmática (Tregunno & Goff, 1996; Robbers et al., 1997; Maestrelli et al., 2001; Giannakourou & Taoukis, 2003).

La calidad del alimento congelado, sin embargo, dependerá de las condiciones del proceso de congelación-descongelación y de los procesos previos involucrados (Li & Sun, 2002). La calidad organoléptica de los alimentos congelados, principalmente los vegetales, puede ser mejorada mediante el incremento de la concentración de sólidos. Esto puede lograrse de varias maneras, entre las cuales figuran el secado con aire caliente y la deshidratación osmótica. Un beneficio adicional está relacionado al consumo energético durante la etapa de congelación, puesto que la energía requerida para la congelación de un alimento parcialmente deshidratado es menor que la requerida para congelar el vegetal fresco ya que es inferior la cantidad de agua en el producto. En consecuencia, las frutas parcialmente deshidratadas tienen menor costo de congelamiento, distribución y almacenamiento.

El interés de la aplicación de una etapa de deshidratación previa a la congelación de frutas ha dado lugar al desarrollo de modelos de predicción del tiempo y de la temperatura de congelación en función de las características del producto, especialmente del contenido de agua (Agnelli et al., 2005; Tocci & Mascheroni, 2008; Bianchi et al., 2008).

El secado de vegetales con aire caliente genera considerables cambios en la estructura física y en la composición química. La remoción de agua incrementa la viscosidad de la parte líquida del tejido y se genera un gradiente de humedad dentro del sólido. Como consecuencia de ello se registraron notables modificaciones en las propiedades organolépticas y nutricionales durante el secado de vegetales (Krokida & Maroulis, 2000; Lewicki & Jakubczyk, 2004; Krokida & Philippopoulos, 2005; Iciek & Krysiak, 2009). La combinación de secado parcial y posterior congelación de frutas no ha sido tan ampliamente estudiada como la osmo-dehidrocongelación, probablemente debido a que el secado involucra mayor consumo energético de la deshidratación osmótica, que origina sustanciales cambios en las características de los vegetales, y que, por otra parte, el proceso de secado por sí mismo puede generar productos autoestables. Se tiene registros de estudios de aplicación de secado con aire caliente previo a la congelación de frutas de alto contenido de agua como melones (Maestrelli et al., 2001); frutillas (Torreggiani et al., 1999; Moraga et al., 2006) y peras (Bolin & Huxsoll, 1993).

En algunos casos, a través del proceso de deshidratación osmótica se logran cambios controlados de las propiedades originales del material fresco que lo tornan más idóneo para el siguiente paso tecnológico de preservación (Torreggiani & Bertolo, 2001). La deshidratación osmótica de frutas y hortalizas es una técnica ampliamente utilizada con el objetivo de obtener nuevos productos de humedad intermedia (Alzamora et al., 2005; Torreggiani & Bertolo, 2001) y como pre-tratamiento del secado con aire (Nieto et al., 1998; Lewicki & Lukaszuk, 2000; Maestrelli et al., 2001) o de la congelación (Talens et al., 2002a,b; Marani et al., 2007).

El proceso de osmodehidrocongelación consiste en someter a las frutas a una etapa de deshidratación osmótica previo a su congelación. Este pretratamiento, además de la ventaja de la remoción de agua y consecuente reducción en la formación de hielo, incrementa el contenido de solutos crioprotectores por impregnación (Tregunno & Goff, 1996; Dermesonlouoglou et al., 2007). Han sido reportados estudios que demuestran los efectos beneficiosos de la deshidratación osmótica como pre-tratamiento al congelado de frutas disminuyendo el pardeamiento (Forni et al., 1997; Marani et al., 2007), el colapso estructural (Talens et al., 2002b) y el exudado durante la descongelación (Marani et al., 2007).

Se ha estudiado la osmo-dehidrocongelación de varios vegetales: damascos (Forni et al., 1997); manzanas (Tregunno & Goff, 1996; Marani et al., 2007); kiwis (Forni et al., 1990; Robbers et al., 1997; Talens et al., 2002b; Chiralt et al., 2001; Marani et al., 2007); melón (Maestrelli et al., 2001); habas (Biswal et al., 1991); frutillas (Chiralt et al., 2001; Talens et al., 2002a; Marani et al., 2007); mango (Nunes et al., 1996; Chiralt et al., 2001), pera (Marani et al., 2007), entre otros. Sin embargo, no se tiene registros de estudios de osmo-dehidrocongelación de ananás.

Se ha estudiado la influencia del proceso de congelación a dos temperaturas diferentes ( $-18^{\circ}\text{C}$  y  $-50^{\circ}\text{C}$ ) y el almacenamiento congelado sobre el color y la calidad sensorial de dos variedades diferentes de ananá (Bartolomé et al., 1996b). La velocidad de congelación no afectó los parámetros del color ni la calidad sensorial del producto.

Por otra parte, en el proceso de congelación de ananá encontraron un leve incremento en el contenido de sacarosa y una leve disminución en el contenido de glucosa y fructosa (Bartolomé et al., 1996a).

Los resultados publicados por Dermesonlouoglou et al. (2007) indican que el proceso de osmo-dehidrocongelado mejora la calidad de tomates durante un período de almacenamiento prolongado, en comparación al producto obtenido con el proceso de congelado tradicional. Los autores encontraron que la retención de vitamina C en las muestras de tomate pre-deshidratadas con glucosa y almacenadas a  $-20^{\circ}\text{C}$  durante 12 meses fue del 81 %, en tanto que en las muestras congeladas sin tratamiento previo la retención del nutriente fue del 44 % del contenido inicial. Los ensayos de evaluación sensorial indicaron que un pre-tratamiento osmótico adecuado previo a la congelación mejora las características sensoriales del tomate descongelado (apariencia más atractiva, color brillante, buena textura y sabor agradable).

Resultados similares en lo respecta a la mayor retención de ácido ascórbico en damascos pre-deshidratados y congelados en comparación con damascos congelados de modo tradicional fueron hallados por Forni et al. (1997).

Moraga et al. (2006) estudiaron el efecto de una deshidratación parcial previa al congelado de frutillas, sobre la calidad final del producto. Se aplicaron dos procesos de para reducir el contenido de agua de la fruta: deshidratación osmótica con solución de sacarosa de 65 °Brix y secado con aire a  $45^{\circ}\text{C}$ . Estos autores encontraron que el secado con aire disminuye

sustancialmente la cantidad de líquido exudado. Similares resultados fueron publicados por Maestrelli et al. (2001) en un estudio de remoción parcial de agua previo al congelado de melón.

En la presente etapa del trabajo de tesis se estudió la variación de algunas características físicas, como la pérdida de líquido por exudado, las propiedades mecánicas y calidad nutricional, en base al contenido de ácido ascórbico, en ananá como consecuencia de aplicación del proceso de dehidrocongelación. Se evaluó el efecto de la aplicación del secado con aire y de la deshidratación osmótica previa a la congelación del producto.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Metodología experimental**

#### **2.1.1 Preparación de la muestra**

Las frutas de *Ananas Comosus* fueron seleccionadas y preparadas de acuerdo a la metodología descrita en el *Capítulo III: Deshidratación Osmótica*.

#### **2.1.2 Deshidratación osmótica**

La deshidratación osmótica (DO) se realizó con solución hipertónica de sacarosa de 60° Brix a 40 °C. El volumen de la solución fue suficiente para garantizar constancia en la concentración de azúcar durante todo el proceso (relación masa jarabe/masa de fruta mayor que 10/1). Para cada ensayo se preparó solución fresca de sacarosa.

El equipamiento utilizado para los tratamientos de DO fue un Shaker, con frecuencia de 75 oscilaciones horizontales por minuto y amplitud de 1 cm, con soporte para 6 frascos erlenmeyer. En cada erlenmeyer conteniendo 500 ml de solución de sacarosa a 40 °C se colocaron cinco muestras de ananá; los frascos se transfirieron en forma inmediata al shaker preacondicionado a 40 °C. A cada tiempo (30, 60, 120, 180 y 240 minutos) se retiró un erlenmeyer, se enjuagó cada muestra con agua desmineralizada a 8 °C durante 3-5 segundos con el propósito de quitar el jarabe adherido a la superficie y el exceso de agua superficial proveniente de esta última etapa se eliminó con papel tissue. Se registró el peso de cada muestra antes y después del proceso de deshidratación.

### 2.1.3 Secado con aire caliente

Los ensayos de secado se realizaron en un secadero de flujo transversal bajo condiciones constantes de velocidad de aire (1.5 m/s) y temperatura (45, 60, 75 °C). El procedimiento de secado fue descrito con detalle en el *Capítulo II: Secado*.

### 2.1.4 Tratamiento de congelación-descongelación

Las muestras (medias rodajas de ananá fresco y parcialmente deshidratado) fueron almacenadas a 4 °C en recipientes plásticos cerrados durante 12 horas, previamente al proceso de congelado, para equilibrar las concentraciones internas de agua y soluto. Posteriormente estas muestras, colocadas sobre bandejas de acero inoxidable perforadas, fueron congeladas en equipo piloto de congelación con circulación de aire a  $-31.5 \pm 1$  °C. Durante este proceso, termocuplas de cobre conectadas a un adquisidor de datos, fueron ubicadas en el centro de cinco muestras procesadas con distintos tiempos de DO y una termocupla fue posicionada dentro de la cámara del congelador. La temperatura de las muestras y del medio fue registrada con intervalos de tiempo de 10 segundos y almacenada en la computadora. Al cabo de dos horas se retiraron del equipo de congelación y el proceso de descongelación se realizó a temperatura constante de 20 °C durante 2 h, en frascos cerrados.

Se evaluó la textura de las muestras deshidratadas antes y después del proceso de congelación-descongelación. Las pérdidas por exudado se evaluaron sobre muestras frescas y deshidratadas.

### 2.1.5 Evaluación de la textura

Las propiedades mecánicas de la fruta fresca, deshidratada y congelada-descongelada se evaluaron a través de ensayos de compresión uniaxial utilizándose a tal fin un Texturómetro Universal (TA-XT2i Texture Analyser). Las muestras de ananá se cortaron con sacabocado en discos de 25 mm de diámetro. Se utilizó un plato de acrílico de 60 mm, el cual fue lubricado con silicona para evitar el efecto de la fricción fruta-plato durante el ensayo de compresión. La velocidad de compresión aplicada fue de 0.5 mm/s hasta el 50 % de deformación de la altura original de la muestra. Estos ensayos se realizaron sobre cinco muestras, a cada tiempo de procesamiento, tomándose la media de estas cinco medidas.

### 2.1.6 Medidas de exudado

Las muestras congeladas se colocaron sobre papel absorbente y se dejaron descongelar a temperatura constante de 20 °C durante 2 h. El sistema completo se mantuvo en frascos cerrados para minimizar las pérdidas por evaporación. Se registró el peso inicial, previo a la descongelación, de cada muestra ( $M_i$ ), el peso del papel seco ( $w_0$ ) y el peso del papel con el líquido de exudado ( $w_i$ ).  $M_0$  representa el peso de cada muestra previo al proceso de deshidratación.

Los resultados se expresaron en gramos de líquido perdido por exudado – *drip loss* - por gramo de fruta y por gramo de fruta fresca:

$$DL_{M_i} = \frac{w_i - w_0}{M_i} \quad (V.1)$$

$$DL_{M_0} = \frac{w_i - w_0}{M_0} \quad (V.2)$$

### 2.1.7 Variación del contenido de vitamina C en el proceso congelación-descongelación

Se evaluó el efecto del proceso de congelación-descongelación sobre el contenido de ácido ascórbico en ananá parcialmente secado con aire y con solución osmótica, antes y después del proceso de congelación-descongelación.

Con el objetivo de aplicar las condiciones más desfavorables (congelación lenta) se congelaron muestras de fruta en freezer del tipo domiciliario por doce horas, luego se mantuvo a temperatura ambiente en frasco cerrado por 2 horas (descongelado) y se cuantificó el contenido de vitamina C. La metodología de cuantificación del ácido ascórbico fue descrita en el *Capítulo II: Secado*.

## 2.2 Consideraciones teóricas

### 2.2.1 Modelo de transferencia de calor aplicado a la congelación

Se aplicó el modelo de transferencia de calor propuesto por Bianchi et al. (2008) para predecir la variación de temperatura en las rodajas de ananá durante la congelación.

Este modelo está basado en la ecuación diferencial de la 2ª Ley de Fourier de conducción de calor en una dimensión y supone que:

- La temperatura y las propiedades físicas están distribuidas simétricamente

- No hay transferencia de masa ni evaporación durante la congelación (aunque existe un cambio de fase)
- No hay generación de calor

A partir de lo cual, los autores llegan a la siguiente ecuación:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla k (\nabla T) = k \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta k}{\delta x} \frac{\delta T}{\delta x} \quad (V.3)$$

Condiciones iniciales:

- $T(x,t) = T_0$  ;  $t = 0$  ;  $-e/2 \leq x \leq e/2 = l$

Condiciones de contorno:

- Centro: se asume que no hay flujo calórico debido a las condiciones de simetría

$$\left. \frac{\delta T}{\delta x} \right|_{x=0} = 0$$

- Superficie: no hay radiación ni evaporación

$$-k \left. \frac{\delta T}{\delta x} \right|_{x=e/2=l} = h(T_s - T_a)$$

Donde:

$\rho$  = densidad de la fruta

$k$  = conductividad térmica

$h$  = coeficiente convectivo de calor

$T$  = temperatura

$t$  = tiempo

$e/2 = l$  = medio espesor de la rodaja de ananá o placa

$x$  = distancia desde el centro de la placa

$C_p$  = capacidad calorífica

$T_s$  = temperatura en la superficie de la fruta

$T_a$  = temperatura del medio refrigerante (aire)

La Ecuación V.3 junto a las condiciones iniciales y de contorno constituyen una ecuación diferencial parcial no lineal. Para su resolución se utilizó el método numérico de diferencias finitas, en un esquema de diferencias finitas explícitas. Las ecuaciones algebraicas resultantes tuvieron la forma:

Nodos interiores:

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\Delta t k_i'}{\Delta x^2 \rho_i' C_{p_i}'} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) + \frac{\Delta t}{4\Delta x^2 \rho_i' C_{p_i}'} (k_{i+1}' - k_{i-1}') (T_{i+1}^t - T_{i-1}^t) \quad (V.4)$$

Nodo del centro de la placa:

$$T_1^{t+\Delta t} = T_1^t + \frac{4\Delta t k_1'}{\Delta x^2 \rho_1' Cp_1'} (T_2^t - T_1^t) \quad (V.5)$$

Nodo de la superficie de la placa:

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{2\Delta t}{\Delta x^2 \rho_i' Cp_i'} (Ta - 2T_i^t + T_{i-1}^t) + \frac{\Delta t}{2\Delta x^2 \rho_i' Cp_i'} [(h \Delta x - k_{i-1}') (Ta - T_{i-1}^t)] \quad (V.6)$$

### 2.2.2 Ecuaciones de predicción de las propiedades de la fruta

Para predecir algunas propiedades físicas de la fruta, necesarias en los cálculos numéricos de las ecuaciones nodales del modelo (Ecuaciones V.4, V.5, V.6), se aplicaron modelos disponibles en la literatura. De esta manera, se realizaron las siguientes estimaciones:

Cálculo de la temperatura de congelación:  $T_{cr}$  (Tocci & Mascheroni, 2008)

$$T_{cr} = 129.37 (W)^3 - 356.67 (W)^2 + 326.11 (W) - 100.55 \quad (V.7)$$

**Propiedades para  $T > T_{cr}$ :**

- *Capacidad calorífica* (Mascheroni, 1995)

$$Cp = 1672 + 2508 W \quad (V.8)$$

- *Densidad:* (Choi & Okos, 1986)

$$\frac{1}{\rho} = \sum \left( \frac{x_i}{\rho_i} \right) \quad (V.9)$$

$$\rho_i = a_i + b_i T$$

(V.10)

$$\rho_a = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2$$

(V.11)

Donde:

$\rho$  = Densidad de la fruta

$\rho_i$  = Densidad de cada componente de la fruta

$x_i$  = fracción en peso de cada componente de la fruta

$\rho_a$  = Densidad del agua

$a_i$  y  $b_i$  = coeficientes individuales de los componentes de la fruta

● **Conductividad Térmica:** (Mascheroni, 1995)

$$k = 0,448 (x_w) + 0,0005 (T_K) \quad (V.12)$$

Donde:

$k$  = coeficiente de conductividad térmica de la fruta

$T_K$  = temperatura (K)

$x_w$  = fracción en peso de agua

**Propiedades para  $T < T_{cr}$ :**

● **Capacidad calorífica:** (Mascheroni, 1995)

$$Cp = Cps (1 - x_w) + x_w (Cph - Cpa) (1 - T_{cr}/T) + Cpa x_w - \lambda x_w T_{cr} / T^2 \quad (V.13)$$

Donde:

$Cps$  = capacidad calorífica de los sólidos

$Cph$  = capacidad calorífica del hielo

$Cpa$  = capacidad calorífica del agua

$\lambda = 333500$  J / kg

● **Densidad:** (Choi & Okos, 1986)

$$\rho = \frac{1}{\left[ \frac{\gamma}{\rho_\gamma} + \frac{(1-\gamma)}{\rho_w} \right] x_w + \frac{(1-x_w)}{\rho_s}} \quad (V.14)$$

Donde

$\rho_\gamma$  = Densidad del hielo

$\rho_s$  = Densidad del sólido

$\rho_w$  = Densidad del agua

$\gamma$  = contenido de hielo  $\cong 1 - (T_{cr} / T)$  (Mascheroni, 1995)

● **Conductividad Térmica:** (Choi & Okos, 1986)

$$k = [\gamma k_\gamma + (1 - \gamma x_w) k_w] x_w + (1 - x_w) k_s \quad (V.15)$$

Donde:

$k_w$  = coeficiente de conductividad térmica para el agua

$k_s$  = coeficiente de conductividad térmica para los sólidos

$k_\gamma$  = coeficiente de conductividad térmica para el hielo

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Historia térmica durante la congelación. Resultados experimentales.

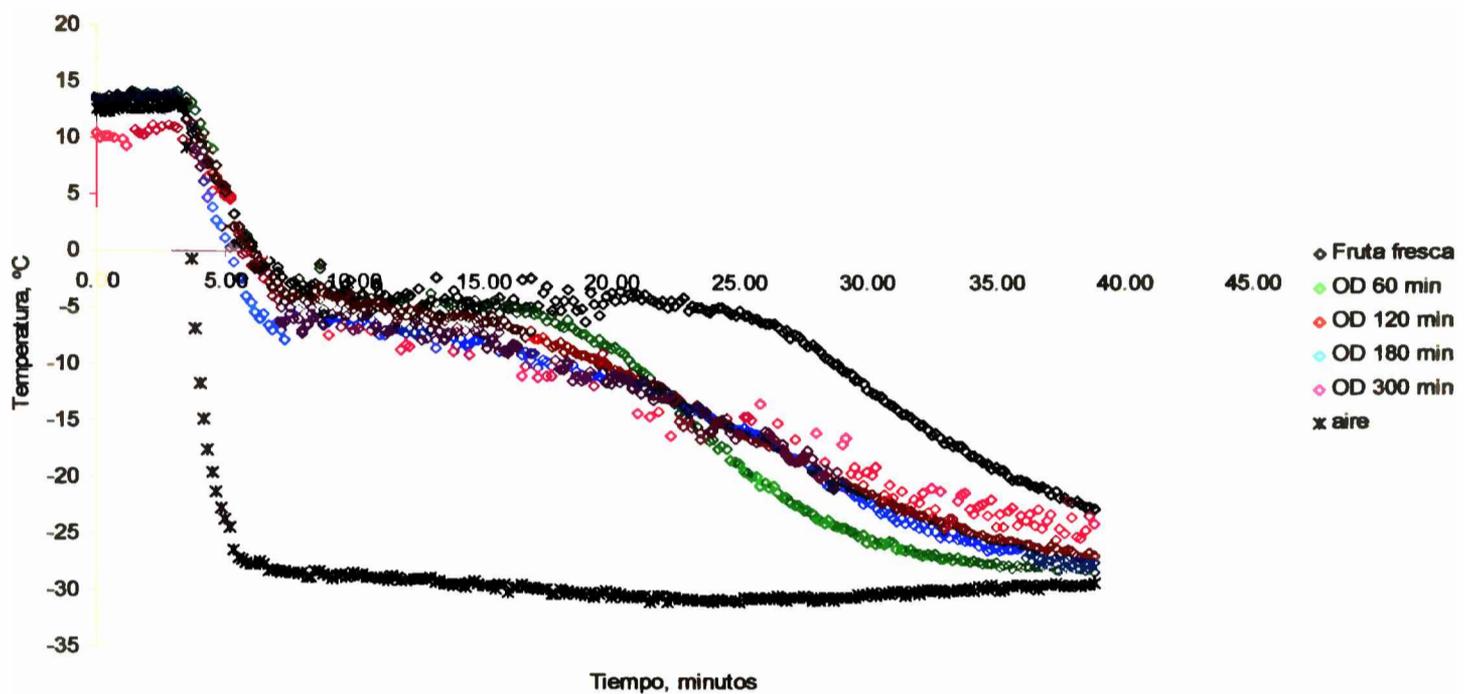
Las cinéticas de secado y de deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa ya fueron estudiadas e informadas en capítulos previos. Para los casos ahora estudiados las composiciones y los tiempos de congelación de la muestra fresca, deshidratadas en aire y en solución de sacarosa se presentan en la Tabla V.1. El tiempo de congelación se consideró como el tiempo necesario para que la temperatura disminuya de 0 a -18 °C.

**Tabla V. 1.** Composición y tiempo de congelación de frutas frescas, deshidratadas en aire a 45, 60 y 75 °C y en solución de sacarosa (DO) de 60 °Brix a 40 °C.

Muestra	Contenido de agua (g/100g de producto)	Contenido de sólidos (g/100g de producto)	Tiempo de congelación (min)
Fresca	84.2	15.8	35 ± 2
DO 60	72.1	27.9	22 ± 1
DO 120	69.9	31.1	21 ± 1
DO 180	63.4	36.5	20 ± 1
DO 300	59.1	40.9	20 ± 2
Fresca	86.4	13.6	41 ± 1
Secada en aire a 45 °C 90'	80.4	21.6	25.5 ± 1
Secada en aire a 45 °C 180'	72.2	27.8	22 ± 1
Secada en aire a 45 °C 260'	68.9	31.1	20 ± 1
Secada en aire a 45 °C 360'	54.5	45.5	18.5 ± 1
Fresca	87.9	12.1	44 ± 2
Secada en aire a 60 °C 60'	80.7	19.3	25 ± 3
Secada en aire a 60 °C 120'	70.1	29.0	22 ± 3
Secada en aire a 60 °C 180'	59.3	40.7	19 ± 2
Secada en aire a 60 °C 240'	45.9	54.1	15 ± 2
Fresca	87.5	12.5	45 ± 1
Secada en aire a 75 °C 45'	79.7	20.3	28 ± 1
Secada en aire a 75 °C 90'	68.8	31.2	24 ± 1
Secada en aire a 75 °C 155'	45.0	55.0	18 ± 1

La evolución de la temperatura durante la congelación de ananá parcialmente deshidratado en solución osmótica se presenta en la Figura V.1. El tiempo de congelación para el ananá fresco varió entre 35 y 44 minutos, mientras que el tiempo de congelación del ananá

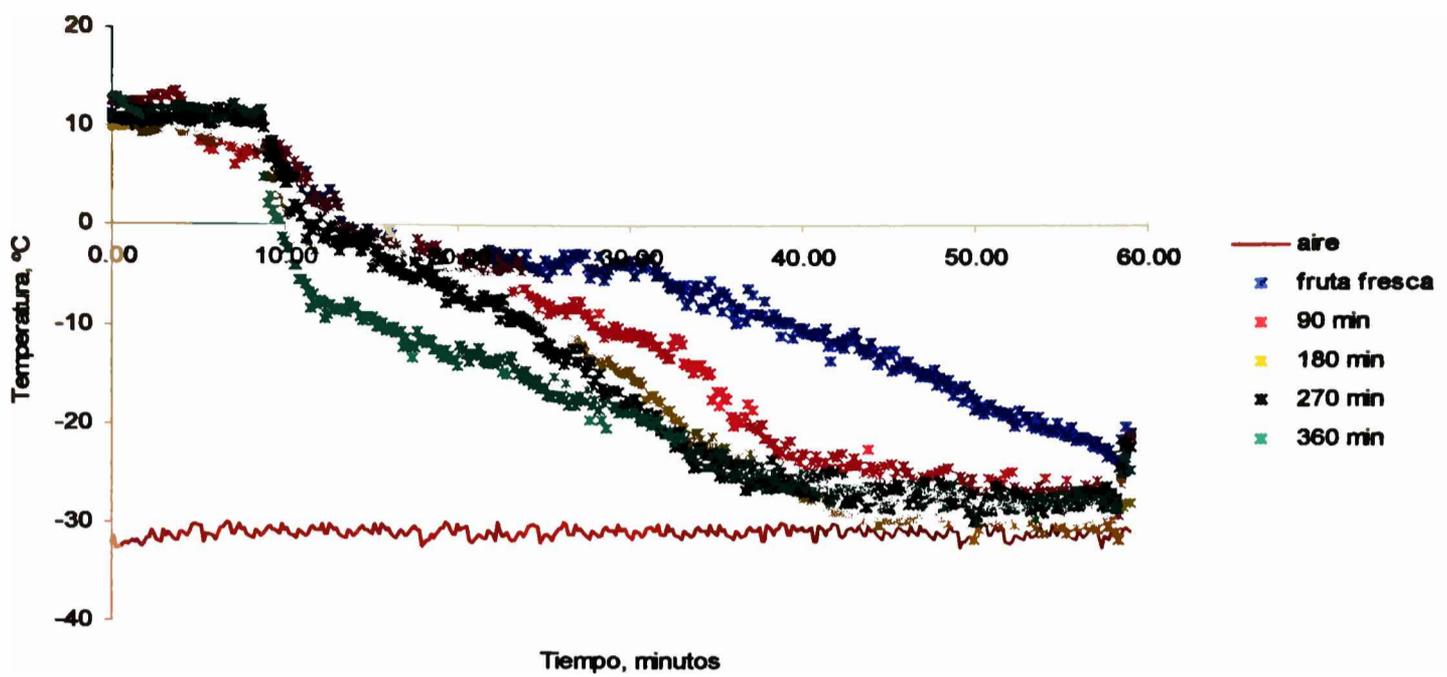
parcialmente deshidratado fue inferior a los 22 minutos, cuando la temperatura en el centro de las muestras descendió de 0 °C a -18 °C. Los tiempos medidos se presentan también en la Tabla V.1. La variación en los valores del tiempo de congelación de la fruta fresca en distintos experimentos puede deberse a errores en el posicionamiento de la termocupla en el centro de la muestra.



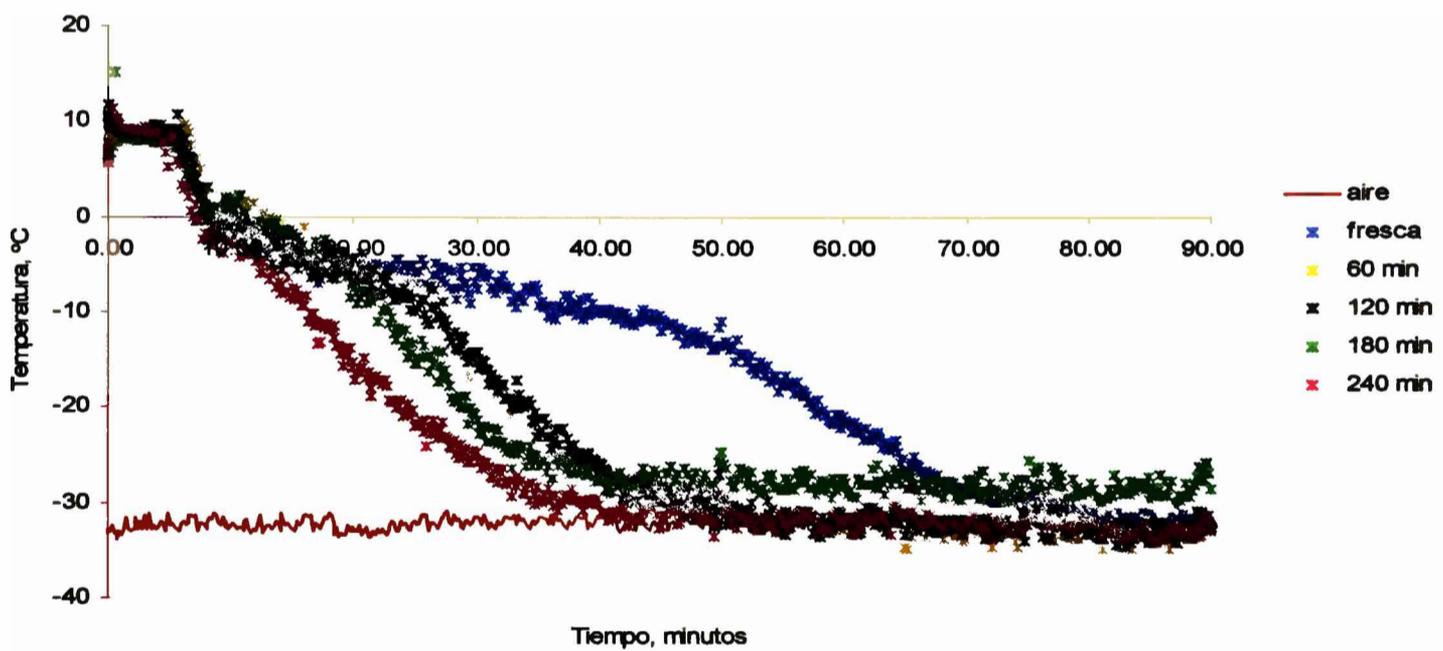
**Figura V.1.** Evolución de la temperatura durante la congelación de ananá fresco y deshidratado en solución de sacarosa (60 °Brix-40 °C) por diferentes tiempos.

El período de cambio de fase en la fruta fresca es marcadamente mas amplio que en las muestras previamente sometidas a una etapa de impregnación con sacarosa; esa región de temperatura aproximadamente constante se estrecha con el aumento del grado de impregnación de las muestras y desciende de aproximadamente -2 °C a -8 °C. Un comportamiento similar en la evolución de la temperatura durante la congelación de discos de pera y de manzana frescos y previamente deshidratados fueron obtenidos por Agnelli et al. (2005).

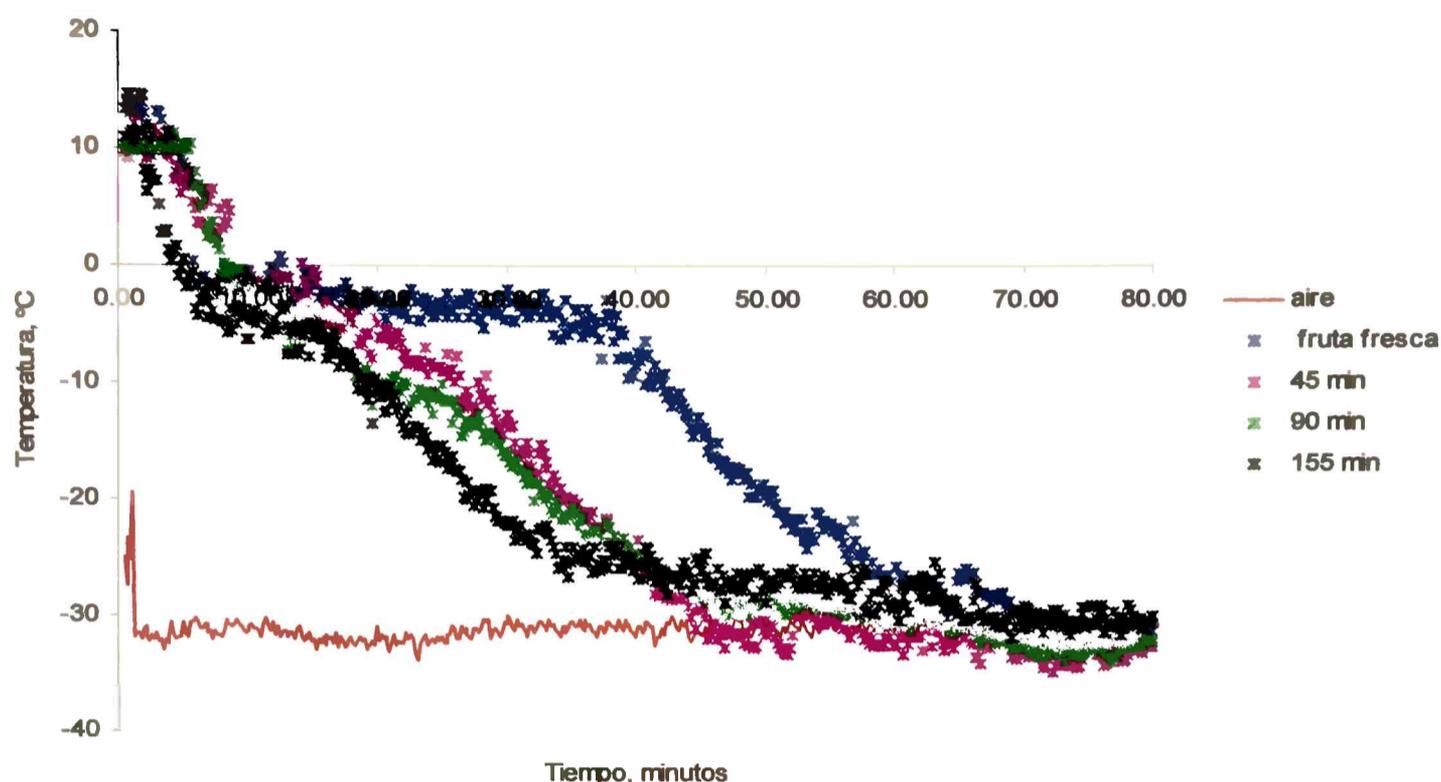
Las Figuras V.2, V.3 y V.4 muestran la evolución de la temperatura durante la congelación de medias rodajas de ananá previamente deshidratadas en corriente de aire a 45, 60 y 75 °C, respectivamente. En las condiciones de operación presentadas, el tiempo de congelación del ananá parcialmente deshidratado varió entre 15 y 26 minutos. Como era de esperar, las muestras de frutas con menor contenido de agua se caracterizan por presentar descenso de temperatura en menos tiempo que aquellas con mayor humedad.



**Figura V. 2.** Evolución de la temperatura durante la congelación de rodajas de ananá fresco y previamente deshidratado en corriente de aire a 45 °C por diferentes tiempos.



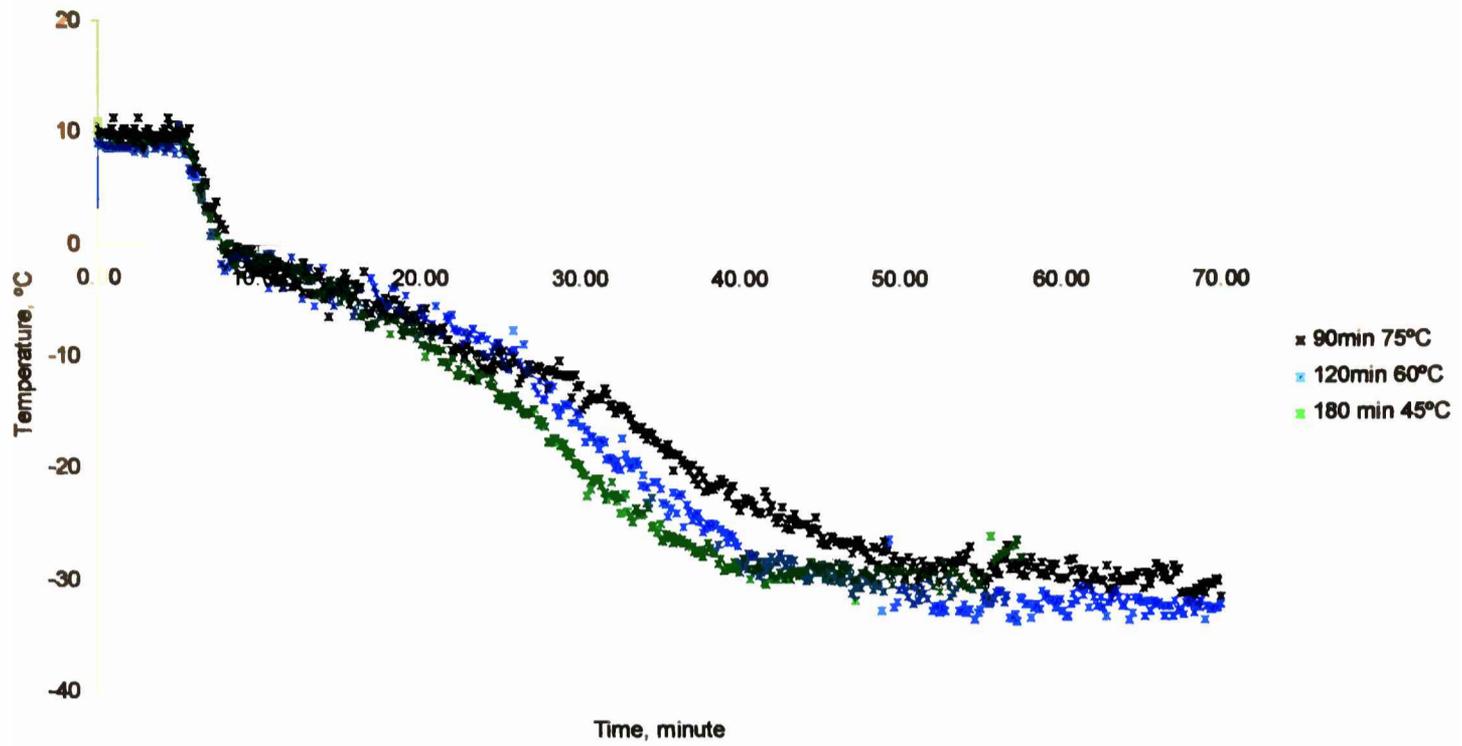
**Figura V. 3.** Evolución de la temperatura durante la congelación de rodajas de ananá fresco y previamente deshidratado en corriente de aire a 60 °C por diferentes tiempos



**Figura V.4.** Evolución de la temperatura durante la congelación de rodajas de ananá fresco y previamente deshidratado en corriente de aire a 75 °C por diferentes tiempos.

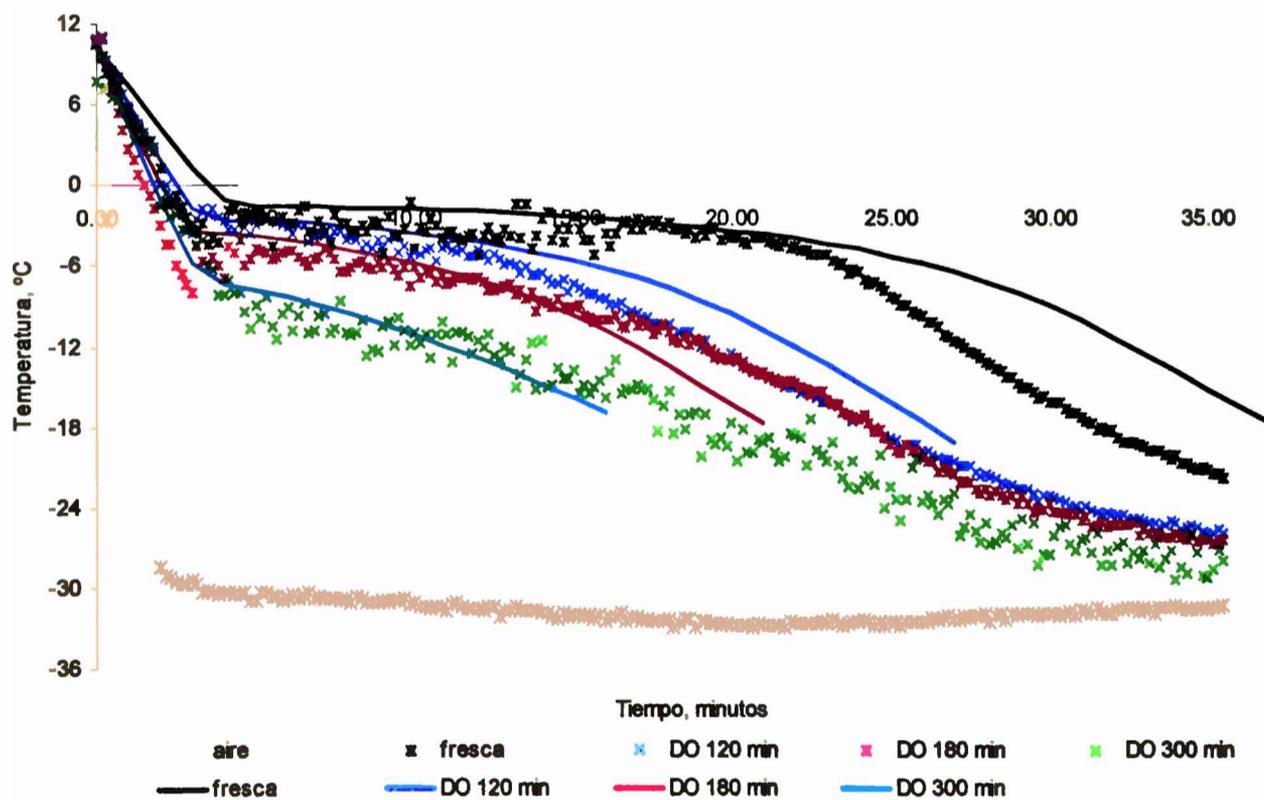
A los fines de comparar el efecto de la temperatura del proceso de secado sobre la velocidad de congelación se graficó la variación de la temperatura durante la congelación de medias rodajas de ananá con valores aproximadamente iguales de humedad, obtenidos mediante procesos de secado a diferente temperatura (Figura V.5). En esta figura se muestra que la temperatura de secado no afecta la forma de las curvas de congelación y que las mismas dependen exclusivamente del contenido de agua de las muestras. La Figura V.5 presenta la historia térmica durante la congelación de medias rodajas de ananá deshidratadas hasta un contenido de agua del 360 %b.s. (aproximadamente 70 %b.h.). Estos valores de humedad se alcanzaron a tiempos de secado diferentes de acuerdo a la temperatura del proceso, como se especifica en las figuras. Este valor de humedad se alcanza en un proceso de deshidratación osmótica a 40 °C y 60 °Brix al tiempo de inmersión de aproximadamente 1 hora.

Estos resultados muestran que un proceso de deshidratación parcial de la fruta podría redundar en una disminución de costos de la operación de congelación en concepto de una disminución del tiempo de duración de esta etapa.



**Figura V.5** Evolución de la temperatura durante la congelación de rodajas de ananá previamente deshidratado a valores humedad de 360 %b.s. en corriente de aire a distintas temperaturas por diferentes tiempos.

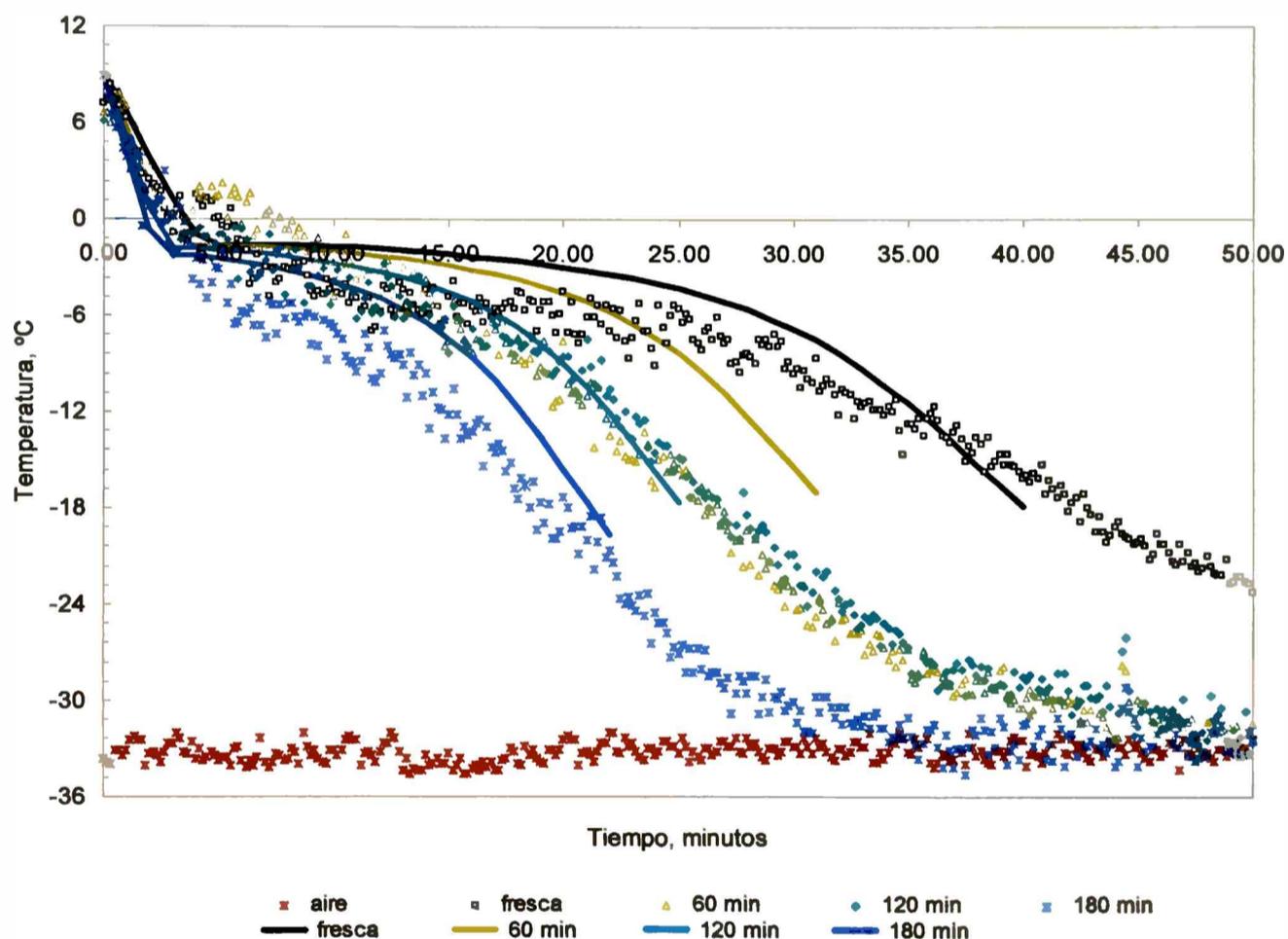
### 3.2 Evolución de la temperatura durante la congelación. Predicciones del modelo aplicado.



**Figura V.6** Evolución de la temperatura, experimental (símbolos) y calculados (lineas llenas) durante la congelación de ananá deshidratado en solución de sacarosa por diferentes tiempos.

Las propiedades físicas de la fruta utilizadas en las ecuaciones de simulación de la evolución de la temperatura durante las experiencias de congelación fueron evaluadas (Ecuaciones V.7 a V.15), para cada condición, con el dato de contenido de agua promedio de la muestra correspondiente.

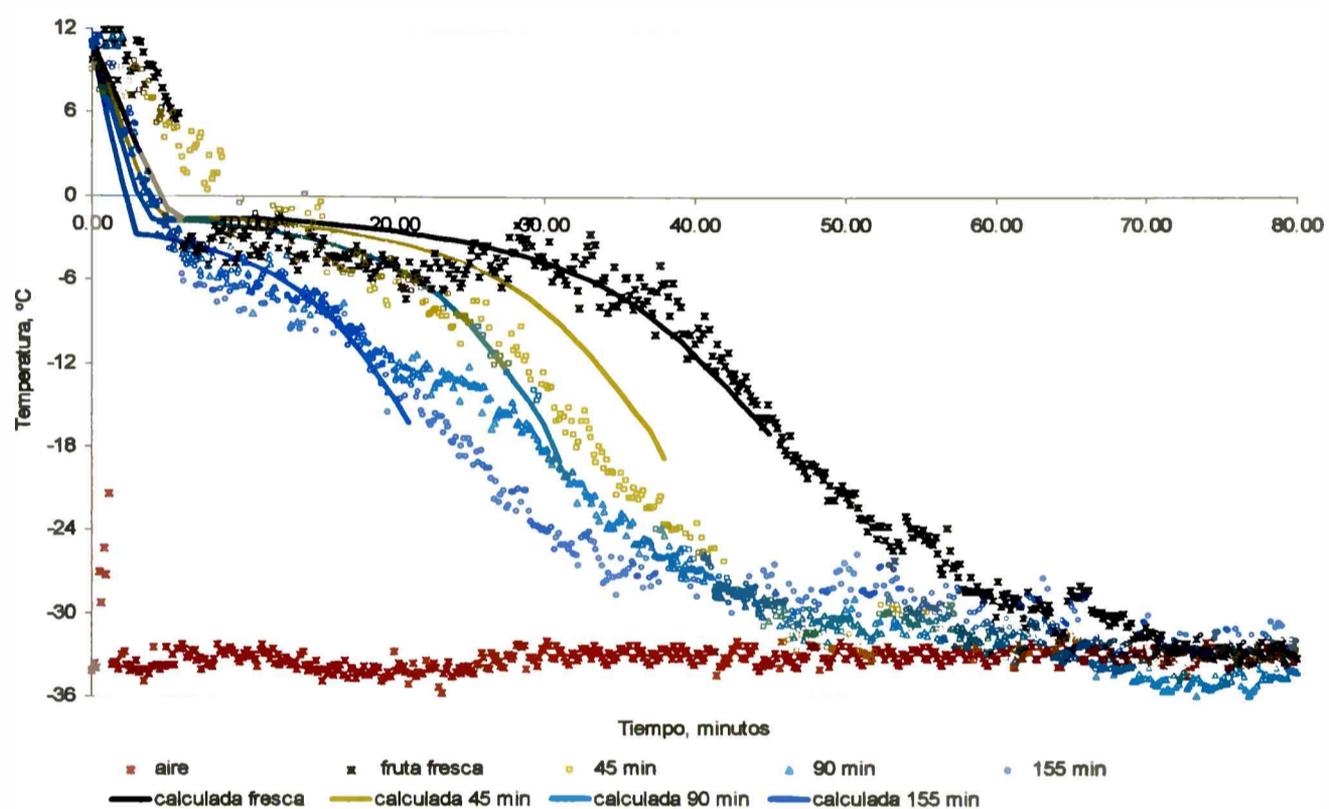
La Figura V.6 muestra los valores experimentales y calculados -con el modelo planteado por Bianchi et al. (2008)- de la temperatura, durante el proceso de congelación de placas de ananá fresco y parcialmente deshidratado en solución de sacarosa. Las predicciones del modelo no son igualmente certeras en todos los casos, posiblemente ello se deba, entre otros factores, a desviaciones en la ubicación de la termocupla dentro de la muestra.



**Figura V.7** Evolución de la temperatura, experimental (símbolos) y calculados (líneas llenas) durante la congelación de rodajas de ananá previamente deshidratado en corriente de aire a 60 °C, por diferentes tiempos.

A modo ilustrativo, en las Figuras V.7 y V.8 se presentan los valores de la temperatura, experimental y calculada con el modelo de Bianchi et al. (2008), durante ensayos de congelación de medias rodajas de ananá previamente secadas con aire caliente a 60 y 75 °C. Comparando estos resultados con los expuestos en la Figura V.6, se observa que el modelo

predice mejor la evolución de la temperatura en la fruta deshidratada por ósmosis que en aquellas deshidratadas con aire caliente. La fruta de ananá presenta una matriz heterogénea, con numerosos espacios de aire y células con diferentes características. Posiblemente esta heterogeneidad afecte de modo menos drástico los resultados de medición y cálculo de la temperatura durante la congelación en muestras deshidratadas por proceso osmótico que en aquellas previamente secadas con aire caliente, ya que en el primer caso los espacios están, al menos parcialmente, cubiertos con solución de sacarosa.



**Figura V.8** Evolución de la temperatura, experimental (símbolos) y calculados (líneas llenas) durante la congelación de rodajas de ananá previamente deshidratado en corriente de aire a 75 °C, por diferentes tiempos.

No obstante, una de las maneras de evaluar la bondad del modelo y la aplicabilidad de estas simulaciones es a través de las diferencias entre los valores del tiempo de congelación calculado y experimental de las distintas muestras. En la valoración de esta característica, el error relativo porcentual es más importante en las muestras secadas a 75 °C, como se ilustra en la Tabla V.2. Una posible explicación del incremento del error en los valores calculados para muestras de ananá secados a temperaturas más altas es la el incremento de heterogeneidad de la composición y estructura del material (se utiliza la concentración promedio en los cálculos).

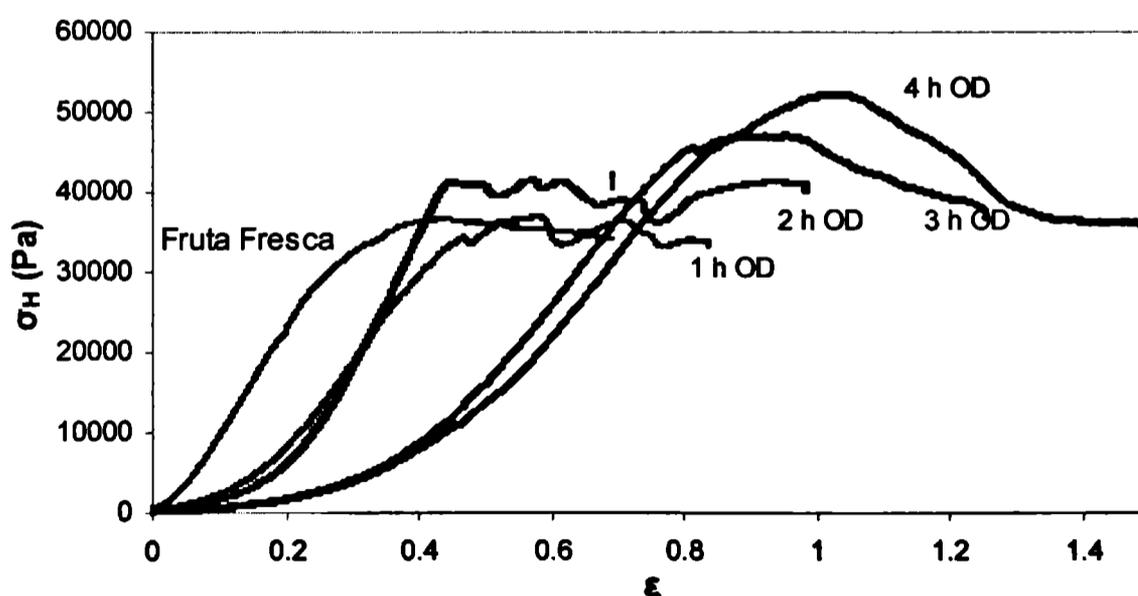
**Tabla V. 2.** Tiempo de congelación calculado y experimental de frutas frescas, deshidratadas en aire y en solución de sacarosa, por diferentes tiempos.

<b>Secado con aire a 45 °C</b>			
<b>Tiempo de secado</b>	<b>tc experimental, min</b>	<b>tc calculado, min</b>	<b>E<sub>pp</sub>, %</b>
0	41.00	36.08	12.00
90	25.50	28.15	10.39
180	22.03	23.44	6.55
270	20.68	19.69	4.79
360	18.5	16.91	8.59
Otros datos utilizados en la simulación	<b>Congelación:</b> Temperatura inicial de las muestras = 10°C, Taire= -32°C h promedio = 18.25 (W/(m <sup>2</sup> °C))		
<b>Secado con aire a 60 °C</b>			
<b>Tiempo de secado</b>	<b>tc experimental, min</b>	<b>tc calculado, min</b>	<b>E<sub>pp</sub>, %</b>
0	44.00	40.08	8.91
60	25.00	31.57	26.28
120	22.00	25.17	14.41
180	19.50	21.16	8.51
Otros datos utilizados en la simulación	<b>Congelación:</b> Temperatura inicial de las muestras = 9°C, Taire= -33°C h promedio = 15.45 (W/(m <sup>2</sup> °C))		
<b>Secado con aire a 75 °C</b>			
<b>Tiempo de secado</b>	<b>tc experimental, min</b>	<b>tc calculado, min</b>	<b>E<sub>pp</sub>, %</b>
0	45.00	45.83	1.84
45	28.00	37.86	35.62
90	24.00	30.99	29.13
155	18.00	21.98	22.11
Otros datos utilizados en la simulación	<b>Congelación:</b> Temperatura inicial de las muestras = 11°C, Taire= -33°C h promedio = 13.50 (W/(m <sup>2</sup> °C))		
<b>Deshidratación osmótica, 60 °Brix - 40 °C</b>			
<b>Tiempo de inmersión</b>	<b>tc experimental, min</b>	<b>tc calculado, min</b>	<b>E<sub>pp</sub>, %</b>
0	35.00	37.14	6.11
120	22.00	26.27	19.41
180	21.00	21.13	0.62
300	20.00	16.95	15.25
Otros datos utilizados en la simulación	<b>Congelación:</b> Temperatura inicial de las muestras = 10.3°C, Taire= -30°C h promedio = 18.80 (W/(m <sup>2</sup> °C))		

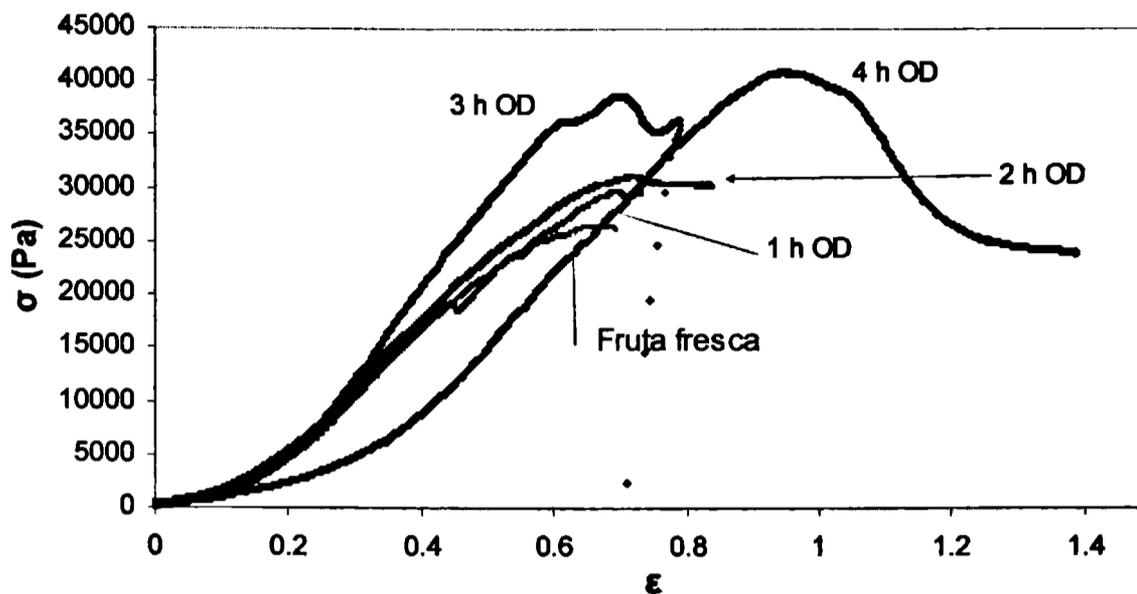
\* Los valores de contenido de agua y espesor de la placa aplicados en los cálculos, fueron los valores experimentales cuantificados para cada caso y cada muestra.

### 3.3 Cambio en las propiedades mecánicas

El módulo de compresión, la tensión y la deformación a la ruptura son propiedades mecánicas que suelen estar asociadas a la firmeza, dureza y elasticidad, respectivamente (Torres et al., 2006). En la Figura V.9 se presentan curvas de compresión uniaxial características de medias rodajas de ananá sometidas a diferentes tiempos de deshidratación osmótica en solución de sacarosa de 60 °Brix y 40 °C, donde se puede observar que la tensión de falla  $\sigma_{Hf}$  aumenta con el tiempo de deshidratación lo cual manifiesta un aumento en la dureza de la fruta. En la Figura V.10 se aprecia el efecto del proceso de congelación-descongelación sobre la respuesta mecánica del ananá fresco y del deshidratado. De estas figuras se observa que el incremento en los valores de  $\sigma_{Hf}$  logrado con la deshidratación se pierde luego de la congelación ya que los valores de tensión a la fractura de las muestras deshidratadas disminuyen drásticamente luego del proceso de congelación-descongelación y se desdibujan los puntos de falla, excepto en las muestras con 4 horas de deshidratación. Un comportamiento análogo fue registrado en todas las muestras de ananá secadas con aire caliente, las curvas muestran una disminución en la tensión de ruptura o falla después del proceso de congelación-deacondelación, como se puede observar en la Tabla V.3. La dureza (evaluada a través de los valores de  $\sigma_{Hf}$ ) de las muestras de ananá secadas con aire caliente fue menos afectada por proceso de congelación-descongelación que la de aquellas deshidratadas a través del proceso osmótico, con similar contenido de agua.



**Figura V.9.** Curvas de compresión uniaxial de ananá con diferentes tiempos de deshidratación osmótica a 60 °Brix y 40 °C.



**Figura V.10.** Curvas de compresión uniaxial de ananá con diferentes tiempos de deshidratación osmótica y posterior proceso de congelación-descongelación.

Como se expresó previamente, son numerosos los factores que afectan las propiedades mecánicas del tejido celular, entre ellas figuran el contenido de agua, la resistencia de la pared celular y la forma en que están ensambladas la células (Chiralt et al., 2001). Dependiendo de las propiedades físicas de las muestras, se han descrito dos modos de falla a la compresión: ruptura celular y desligamiento de las células (Chiralt et al., 2001). La congelación, debido a la formación de hielo, produce cambios en el tejido celular que pueden afectar el mecanismo de falla predominante durante la compresión. Este efecto puede manifestarse a través del comportamiento mecánico del sistema. La Tabla V.3 muestra que tanto la deshidratación osmótica como el secado generan incremento en la deformación a la fractura ( $\epsilon_{Hf}$ ) y en los valores de la tensión de falla ( $\sigma_{Hf}$ ) y disminución en los valores de la pendiente inicial de la curva o módulo de compresión ( $E$ ), evidenciando mayor firmeza en la fruta deshidratada.

La deformación a la fractura se incrementa con el tiempo de deshidratación; a su vez, la congelación-descongelación provoca un aumento en los valores de este parámetro acentuándose este efecto en las muestras con mayor humedad. Lo antes expuesto estaría indicando que el proceso de congelación-descongelación provoca pérdida de firmeza y de turgor en el tejido vegetal, principalmente en las muestras de ananá sin deshidratar o mínimamente deshidratadas. Este resultado puede ser atribuido al daño celular generado

por la formación de cristales de hielo. Talens et al. (2002b) registraron un comportamiento similar en kiwis, donde los mayores cambios de  $\epsilon_{Hf}$  por efecto de la congelación se producen en la fruta sin deshidratar. Todas las muestras de ananá secadas con aire caliente seguido por un tratamiento de congelación-descongelación mostraron mayor resistencia a la compresión que la fruta fresca.

**Tabla V.3.** Tensión ( $\sigma_{Hf}$ ) y deformación ( $\epsilon_{Hf}$ ) de falla y modulo de compresión (E) de rodajas de ananá, deshidratadas con aire caliente y con solución de sacarosa, antes del congelado y después del congelado-descongelado.

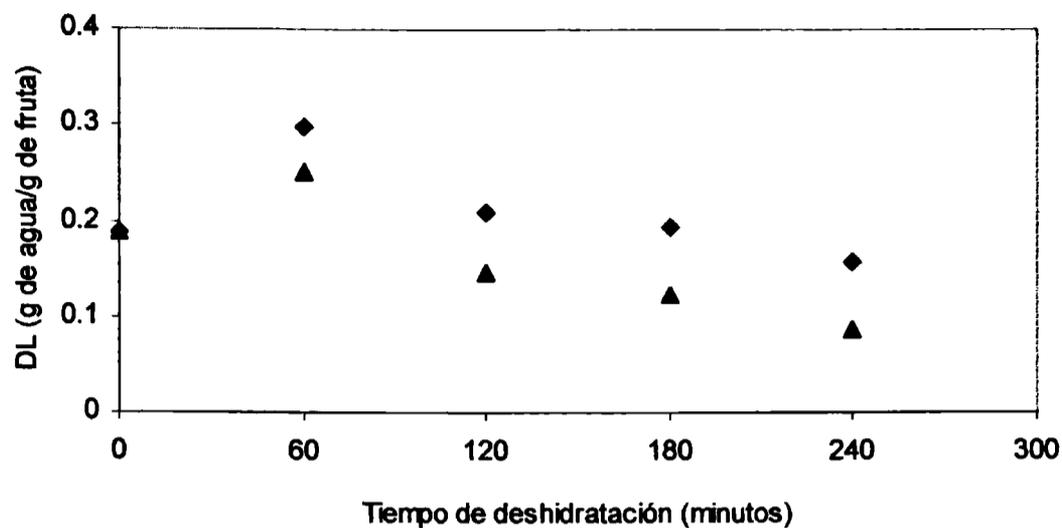
Tiempo de deshidratación (min)	Deshidratado			Deshidratado + congelado		
	$\sigma_{Hf} \pm sd$ (kPa)	$\epsilon_{Hf} \pm sd$	$E \pm sd$ (kPa)	$\sigma_{Hf} \pm sd$ (kPa)	$\epsilon_{Hf} \pm sd$	$E \pm sd$ (kPa)
Secado con aire a 45 °C						
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31	31.35±9.64	0.50±0.050	30.77±6.29
90	56.46±6.77	0.37±0.051	25.55±3.30	51.22±0.65	0.51±0.056	15.63±2.68
180	90.26±9.11	0.59±0.053	19.66±6.33	83.99±6.75	0.54±0.036	13.15±3.87
270	111.99±14.51	0.56±0.098	14.78±5.83	87.91±15.32	0.63±0.031	9.45±1.66
360	139.46±20.94	0.69±0.05	11.99±4.78	169.28±10.87	0.78±0.015	8.89±2.55
Secado con aire a 60 °C						
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31	31.35±9.64	0.50±0.050	30.77±6.29
60	74.94±9.48	0.45±0.024	23.41±5.96	54.60±9.79	0.58±0.100	18.69±1.56
120	77.79±9.98	0.56±0.078	21.25±6.17	56.98±5.95	0.56±0.020	12.73±4.46
180	98.63±8.88	0.62±0.075	13.51±3.55	76.24±11.56	0.78±0.039	9.40±1.76
Secado con aire a 75 °C						
0	48.42±4.87	0.32±0.045	69.54±8.31	31.35±9.64	0.50±0.050	30.77±6.29
45	76.07±10.33	0.45±0.065	28.36±9.89	63.92±8.41	0.76±0.094	15.56±3.72
90	91.85±16.99	0.48±0.054	25.42±9.90	83.92±10.82	0.64±0.088	13.09±4.08
155	98.67±11.48	0.76±0.092	13.21±4.15	108.62±16.02	0.81±0.065	11.10±2.32
Deshidratación osmótica a 60 °Brix-40 °C						
0	44.88±7.27	0.35±0.089	48.22±10.64	29.56±6.61	0.55±0.078	26.64±7.82
60	40.56±4.23	0.44±0.067	21.38±6.58	30.52±11.66	0.61±0.055	10.69±2.30
120	42.86±8.03	0.52±0.063	20.13±7.21	35.41±10.93	0.66±0.043	9.69±4.72
180	56.61±11.23	0.75±0.072	15.87±3.39	39.08±12.64	0.69±0.061	8.23±3.05
240	57.33±14.11	0.89±0.089	12.93±2.54	41.58±7.24	0.97±0.084	7.27±2.25

En lo que respecta al módulo de compresión del ananá, los resultados mostrados en la Tabla V.3 se puede observar que los cambios más importantes de este parámetro ocurren durante los primeros tiempos de DO y de secado y que el proceso de congelación-descongelación reduce el valor de este parámetro.

Este comportamiento es similar al registrado por Maestrelli et al. (2001) al aplicar DO como pretratamiento en la congelación de melón. Torreggiani et al. (1999) encontraron que si bien el proceso de congelación-descongelación provoca una disminución en la firmeza de frutillas, esta propiedad mecánica no difiere entre las muestras con 0, 2 y 4 horas de inmersión en solución de glucosa después del proceso de congelación-descongelación. Marani et al. (2007) mostraron que diferentes frutas presentan distinto comportamiento mecánico durante la deshidratación osmótica y que dicho comportamiento varía, además, con el tipo de azúcar utilizado en el proceso. Así, la resistencia a la punción de manzanas, peras, kiwis y frutillas, se ve afectada con distinto grado de significación, incrementándose en ese orden. El proceso de congelación-descongelación de estas frutas afecta en todos los casos su dureza, aunque el efecto tiene diferente importancia en cada fruta.

### **3.4 Pérdidas de agua por exudado**

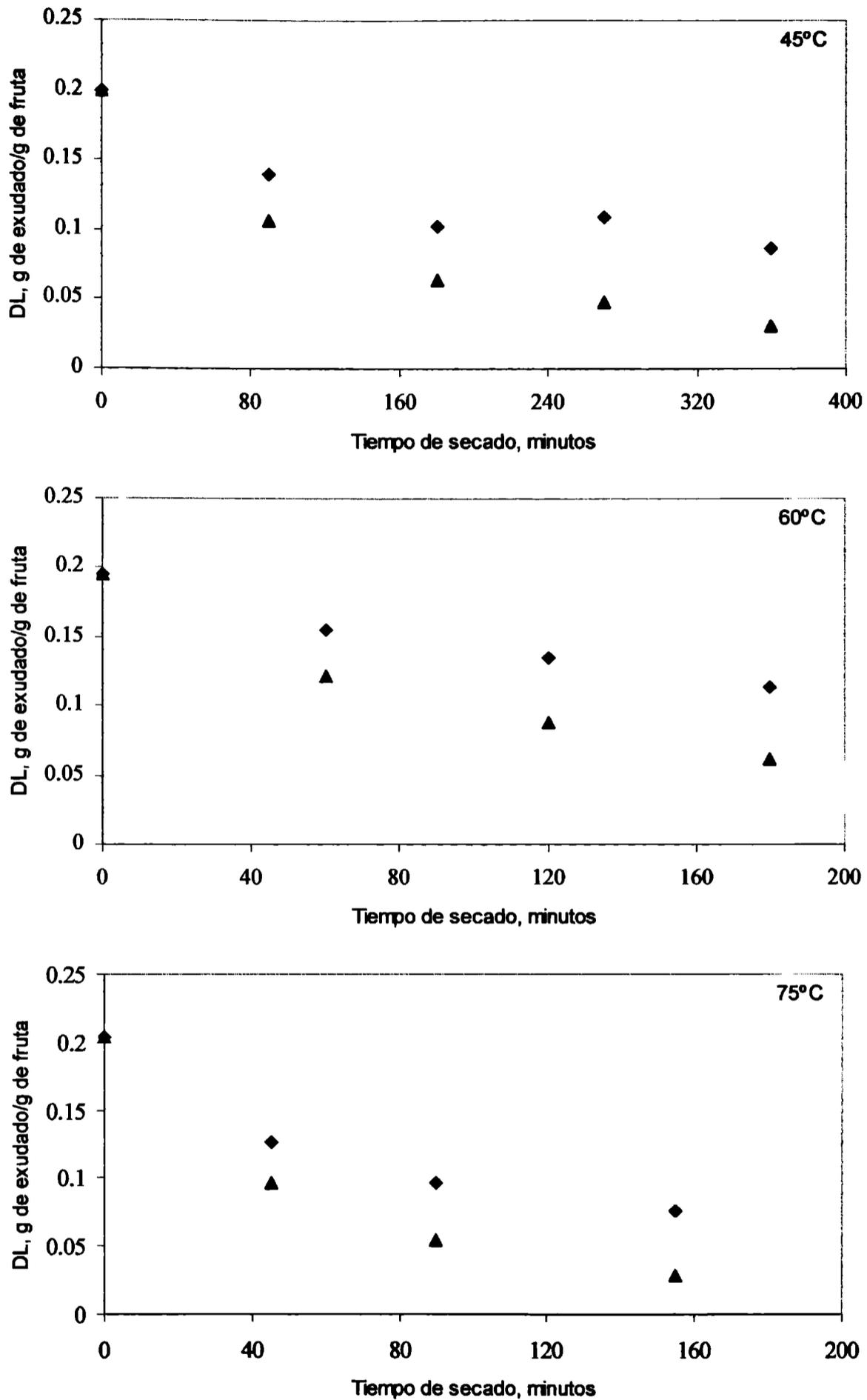
Todas las muestras pierden líquido durante el proceso de descongelación. Se observó un aumento en la cantidad de exudado en las medias rodajas de ananá con una hora de deshidratación osmótica respecto de las muestras que no estuvieron en contacto con la solución hipertónica (Figura V.11). Este resultado parece contradecir las expectativas del efecto crioprotector del azúcar (Nunes et al., 1996; Talens et al., 2002b), pero dicho comportamiento podría explicarse en base al perfil de soluto y de humedad generado durante el proceso osmótico. Durante el período de descongelación, la elevada concentración de azúcar en la superficie de la fruta puede provocar la migración de agua desde el interior, donde la concentración de soluto ha permanecido prácticamente constante, como se mostró en el Capítulo III. Similar comportamiento fue reportado por Marani et al. (2007) durante la descongelación de frutillas previamente sometidas a deshidratación osmótica; Akbaba & Icier (1998) encontraron que la cantidad de exudado de frutillas envasadas cubiertas con azúcar cristalino fue mayor que en frutillas frescas.



**Figura V.11.** Exudado producido durante la descongelación de medias rodajas de ananá previamente sometidas a distintos tiempos de deshidratación en solución de sacarosa. ▲ g de agua/ g de fruta fresca; ◆ g de agua/ g de fruta deshidratada

Con el aumento del tiempo de inmersión en solución de sacarosa disminuyen las pérdidas por exudado, aunque se requieren períodos de deshidratación osmótica mayores que 120 minutos para obtener resultados positivos del efecto crioprotector del azúcar impregnado en la matriz vegetal. A este tiempo la concentración de sacarosa aumentó aproximadamente tres veces su valor inicial.

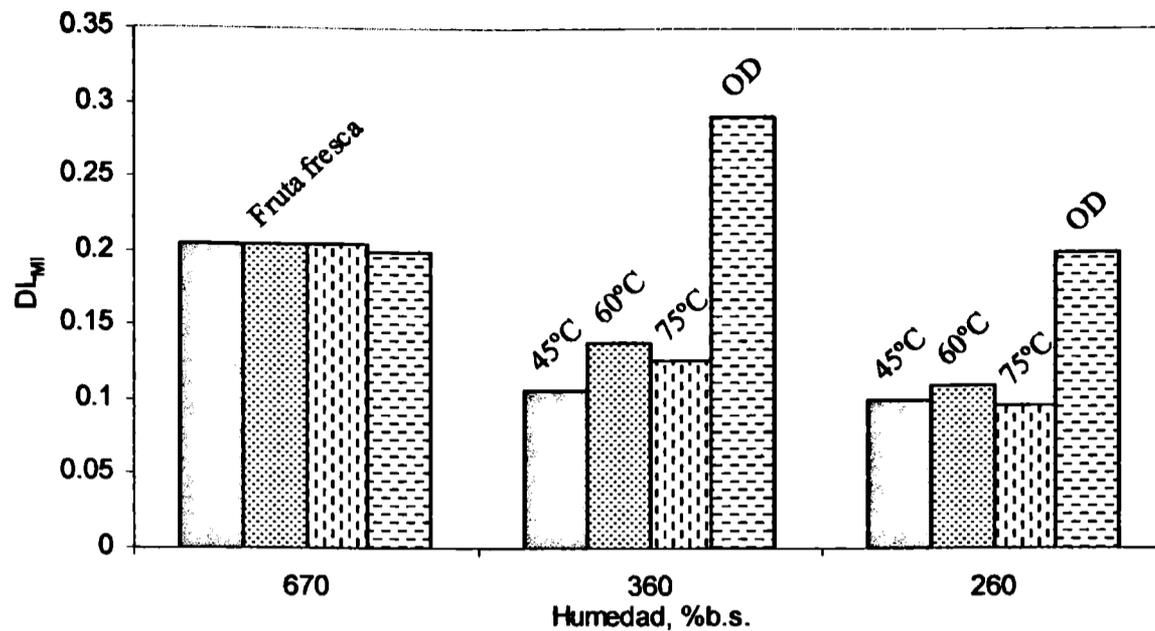
La cantidad de líquido exudado (en g/g de fruta deshidratada y en g/g de fruta fresca) en muestras de ananá previamente secadas con aire a diferentes temperaturas (45, 60 y 75 °C) y por distintos tiempos se presentan en la Figura V.12. En estas figuras se observa que la deshidratación con aire provoca disminución del exudado en las diferentes condiciones de secado y que la cantidad de exudado disminuye con el grado de deshidratación de la fruta. Este hecho es predecible a partir de la base que el secado disminuye el contenido de agua congelable, lo cual implica menor daño celular por formación de cristales de hielo.



**Figura V.12.** Exudado producido durante la descongelación de medias rodajas de ananá previamente sometidas al secado con aire a diferente temperatura por distintos tiempos. ▲ g de agua/ g de fruta fresca; ◆ g de agua/ g de fruta deshidratada

Para puntualizar el efecto de los diferentes procesos sobre el exudado se presentan los mismos resultados en la Figura V.13; aquí puede apreciarse para igual valor de humedad en la fruta, la cantidad de líquido exudado es mayor en las muestras de fruta previamente deshidratadas por ósmosis que en aquellas deshidratadas con aire. En la fruta pre-deshidratadas hasta un contenido de agua de 360 g/100 g de masa seca se registraron valores medios de exudado en las frutas pre-tratadas con DO superiores a los valores de exudado registrados en la fruta sin pre-tratamiento.

Estos resultados podrían deberse a que a iguales valores de humedad, la fruta secada con aire presenta menor cantidad de fase líquida, debido a que no hubo ganancia de sólidos externos durante el proceso. Otro factor que puede explicar este fenómeno es un mayor grado de deshidratación en las células externas de sólido durante el secado que durante el proceso de DO. Una tercera explicación estaría en el elevado contenido de azúcar en la superficie respecto del interior de las muestras pre-tratadas con DO, como se señaló en párrafos anteriores. Este último factor podría ser el de mayor impacto en las diferencias del volumen de exudado resultante en las muestras de ananá sometidas a distintos pre-tratamientos de deshidratación. La temperatura del proceso de secado parece no afectar el volumen exudado durante la descongelación de la fruta, cuando se comparan muestras de igual humedad. Estos resultados están en concordancia con los publicados por Maestrelli et al. (2001) y Moraga et al. (2006), quienes observaron, en estudios de congelación de melón y frutilla, respectivamente, que mientras el secado con aire o la combinación de DO y secado con aire disminuye las pérdidas por exudado, el proceso de deshidratación osmótica solo actúa en sentido inverso.

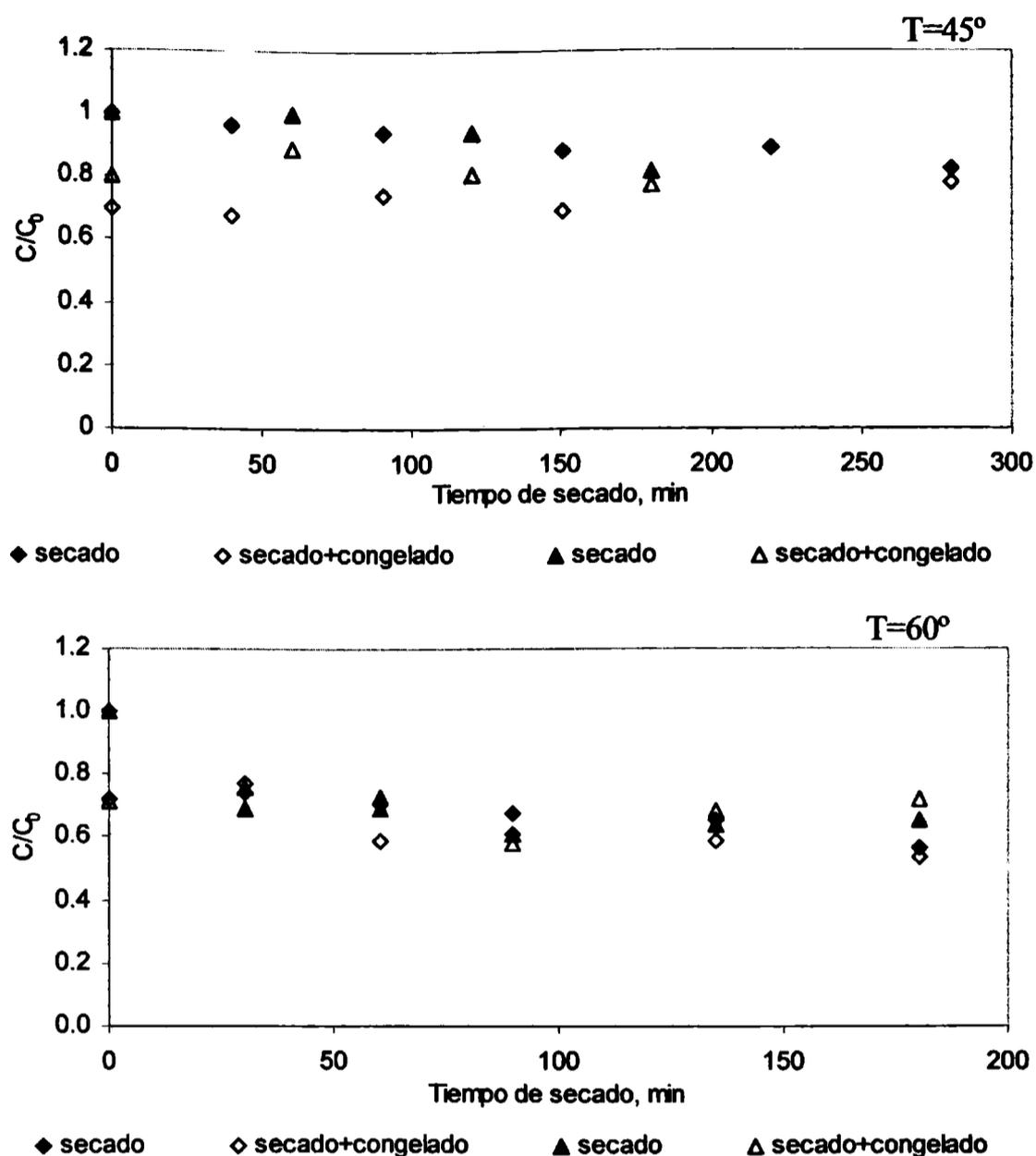


**Figura V.13** Valores medios de exudado (g/g de producto) de ananá congelado a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  sin pre-tratamiento (fruta fresca), pre-deshidratada con aire ( $45$ ,  $60$  y  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y mediante proceso osmótico (DO) a dos valores de humedad ( $260$  y  $360\text{ %b.s.}$ )

### 3.5 Pérdidas de vitaminas

#### 3.5.1 Efecto del secado con aire-congelación-descongelación

Los vegetales no realizan un aporte importante de energía en la dieta diaria, sin embargo constituyen un componente imprescindible en la misma porque proveen fibras y gran cantidad y variedad de vitaminas y minerales que intervienen en las funciones fisiológicas. El ananá contiene importante concentración de vitamina C en su composición. Debido a su elevado contenido de agua, el tiempo de vida útil posterior a la cosecha es corto. Con el objetivo de conservar este alimento por más tiempo, con la mínima alteración de sus cualidades organolépticas y nutricionales, se estudia la combinación de secado con aire caliente (hasta diferentes valores de humedad) y posterior congelación, analizando la degradación de la vitamina C en cada tratamiento.



**Figura V.14.** Pérdida de ácido ascórbico en ananá durante el secado a 45 y 60 °C antes del congelado (símbolos llenos) y después del congelado (símbolos huecos).

Los resultados de variación del ácido ascórbico durante el secado con aire que se presentan en la Figura V.14 son valores medios, ya que cada experiencia se llevó a cabo por duplicado. Las concentraciones se midieron en miligramos de vitamina por gramo sólido seco. Los valores de contenido de ácido ascórbico se expresan relativos al contenido del mismo en la fruta fresca, previo al congelado. El contenido de ácido L-ascórbico en la fruta fresca de ananá presentó una gran variabilidad, como se mostró en los capítulos previos. Las muestras de fruta con alto contenido de agua presentaron una importante pérdida del contenido de ácido ascórbico por efecto del congelado y descongelado. La fruta fresca tuvo una disminución en la concentración de vitamina C de aproximadamente el 25 % en el

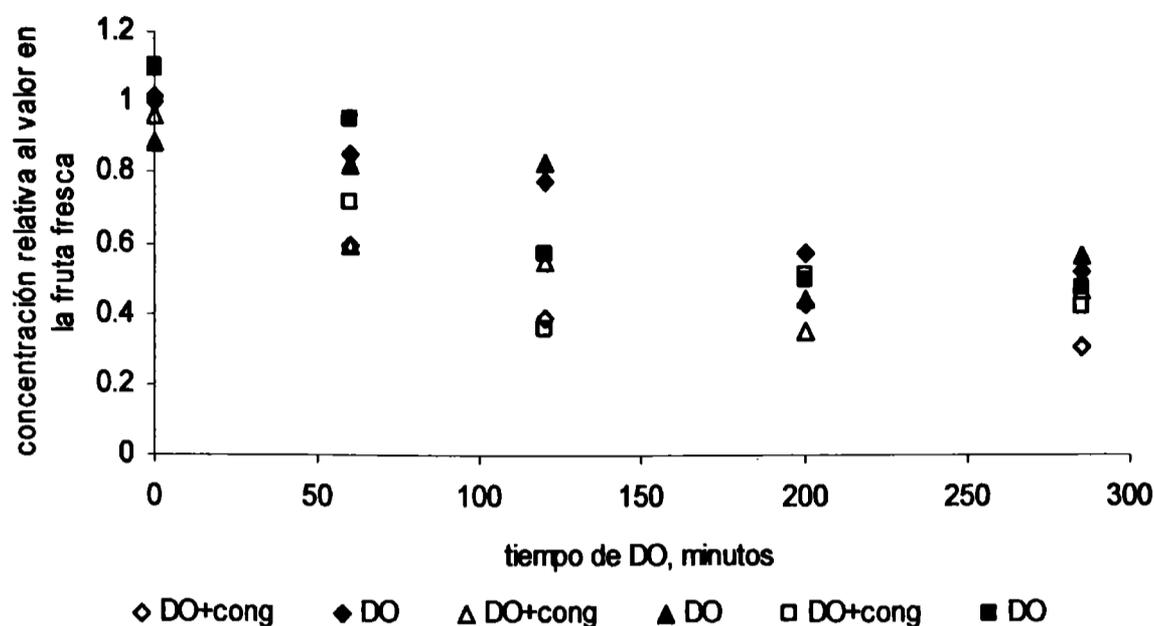
ensayo que se muestra en la Figura V.14; este efecto se repitió en 16 muestras analizadas aunque el rango de pérdida de ácido ascórbico varió entre el 15 y el 25 %

Las muestras de fruta con menor contenido de agua presentan poco cambio en el contenido de vitamina C por efecto del congelado y descongelado; así, durante el secado a 60 °C esta diferencia es inferior al 7 %. En cambio, los resultados obtenidos al cabo de 150 minutos de secado a 45 °C muestran una diferencia de aproximadamente el 15 % entre el contenido de ácido ascórbico de la fruta seca y seca-congelada-descongelada, esta diferencia disminuyó en las muestras con períodos de secado más prolongados.

Como es bien sabido, un incremento en la temperatura de secado favorece la velocidad del proceso, pero simultáneamente aumenta la velocidad de degradación del ácido ascórbico. Es por ello que la retención de ácido ascórbico en ananá es inferior durante el secado a 60 °C y, aunque las pérdidas del nutriente no se incrementen en el proceso de congelación-descongelación, el efecto final es que las muestras de fruta secadas a 60 °C contendrán menos ácido ascórbico que aquellas secadas a 45 °C, principalmente si se comparan tiempos largos de secado.

### **3.5.2 Efecto de la deshidratación osmótica-congelación-descongelación**

El contenido de ácido ascórbico durante la deshidratación osmótica se midió en mg de vitamina por 100 gramos de fruta fresca. Los resultados se representan relativos al contenido de ácido ascórbico en la fruta fresca, sin congelar y congelada respectivamente,  $C/C_0$ . Los resultados se exhiben en la Figura V.15.

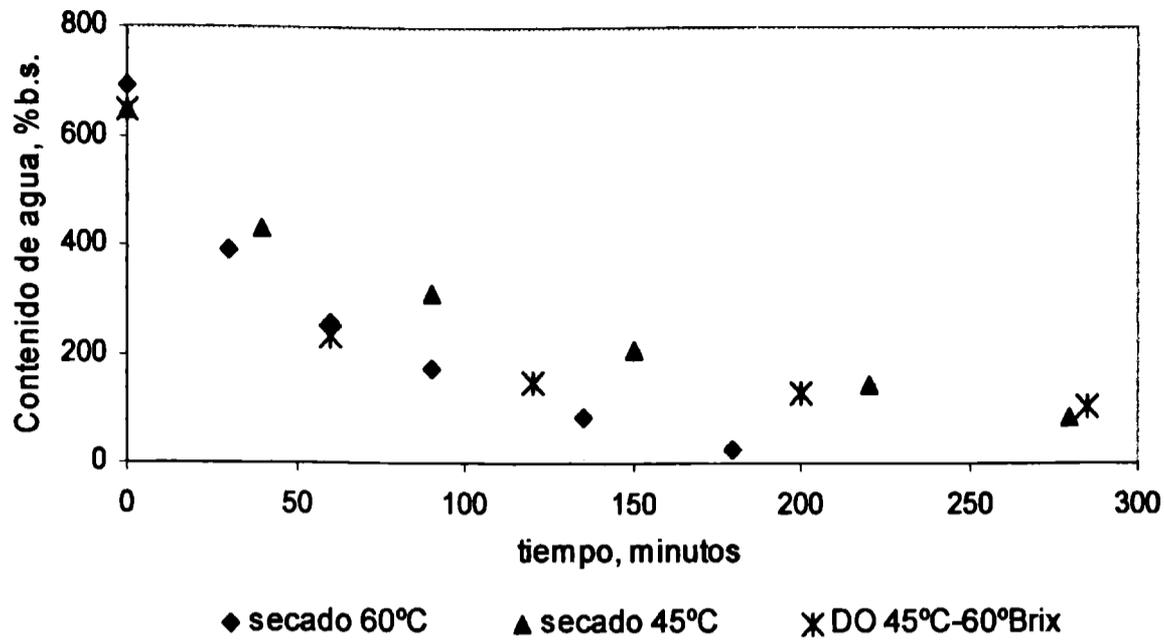


**Figura V.15.** Variación del contenido de ácido ascórbico en ananá durante la deshidratación osmótica a 45 °C-60 °Brix antes del congelado (símbolos llenos) y después del congelado (símbolos huecos).

Se registraron diferencias entre los valores de contenido de ácido ascórbico en las muestras con y sin congelación, en los casos en que los tiempos de deshidratación fueron menores a 300 min (Figura V.15), donde las pérdidas por exudado son más importantes como se mostró anteriormente. Se valoró el contenido de ácido ascórbico en el exudado y los valores hallados indicaron que mientras que en la fruta congelada-descongelada la concentración fue de  $C_{AA} = 14.4 \pm 1.03$  mg/100 g de fruta, en el exudado  $C_{AA} = 18.37 \pm 1.32$  mg/100 ml.

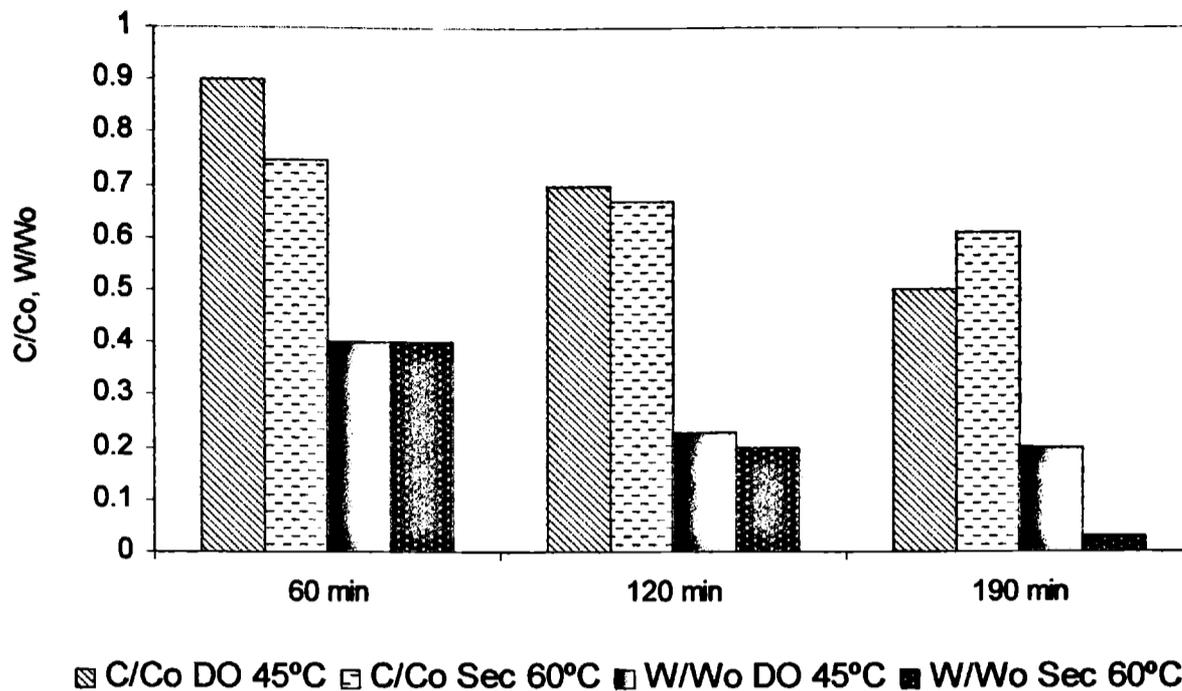
### 3.5.3 Comparación del efecto de la DO y el secado sobre la pérdida de Vitamina C

Durante ambos procesos, deshidratación osmótica y secado, desciende tanto el contenido de agua como de vitamina C en el ananá. En las Figuras V.14, V.15 y V.16 pueden verse los cambios en el contenido de agua y en el contenido de vitamina C durante el proceso, para los ensayos respectivos.



**Figura V.16.** Variación del contenido de agua en ananá durante los procesos de deshidratación osmótica a 45 °C-60 °Brix y secado a 45 y 60 °C.

A través de la comparación de los resultados expuestos en estas figuras se puede decir que en dos horas de procesamiento la cantidad de agua retirada mediante el tratamiento osmótico a 45 °C y mediante el secado con aire a 60 °C son equivalentes, en tanto que la pérdida de ácido ascórbico fue de aproximadamente el 35 % y el 30 % durante el secado y durante la deshidratación osmótica, respectivamente. En ese tiempo se extrajo aproximadamente el 62 % del agua contenida en la fruta fresca. A medida que continúa el proceso de deshidratación el secado con aire pareciera presentar ventajas sobre la DO: a 200 minutos de procesamiento registraron valores de caída en la concentración del AA del orden del 42 % para el secado y del 50 % para la DO, en tanto que la cantidad de agua extraída mediante el secado con aire es mayor que a través de la DO. Estas relaciones se evidencian en la Figura V.17.



**Figura V.17** Comparación de los valores de contenido de agua y de vitamina C en ananá durante los procesos de deshidratación osmótica a 45 °C-60 °Brix y secado a 60 °C.

#### 4. Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede concluir que tanto la deshidratación osmótica como el secado aplicados en una etapa previa a la congelación tiene el beneficioso efecto de disminuir el tiempo necesario para la congelación de las muestras de ananá. Asimismo, se comprobó que el modelo de Bianchi et al. (2008) permite predecir el tiempo de congelación de la fruta con valores del error relativo porcentual de la estimación que varían desde el 1.5 al 20 %.

Aún cuando el proceso de deshidratación de ananá origina una estructura celular igual o más resistente que la fruta fresca, el posterior proceso de congelación-descongelación de las mismas causa pérdida de firmeza y una marcada disminución de la resistencia a la ruptura. El proceso de congelación-descongelación causa incremento en los valores de deformación a la fractura o falla y reducción en los valores de tensión de falla y en el módulo de compresión del ananá. Este efecto es más drástico en aquellas muestras con mayor contenido de agua.

Los resultados obtenidos indican que la deshidratación con aire caliente como pre-tratamiento del proceso de congelación, reduce significativamente el volumen de exudado durante la descongelación del producto. Por el contrario, el proceso de deshidratación

osmótica previo a la congelación de ananá puede incrementar el volumen de exudado resultante. Así, las pérdidas por exudado fueron mayores en muestras de ananá con una hora de deshidratación osmótica respecto de aquellas que no estuvieron en contacto con la solución hipertónica; seguidamente estos valores disminuyen en relación al incremento del grado de deshidratación de la matriz vegetal.

En la fruta fresca se observó disminución en el contenido ácido ascórbico después del proceso de congelación-descongelación.

En las muestras de ananá parcialmente deshidratado, donde la cantidad de exudado es muy importante, se observó una pérdida adicional en el contenido de ácido ascórbico después del proceso de congelación-descongelación. En 120 minutos de deshidratación osmótica a 45 °C la humedad se reduce en un 70-75 % y el contenido de ácido ascórbico en un 35 % aproximadamente.

Se compararon muestras deshidratadas con aire caliente y mediante deshidratación osmótica previo a la congelación y se observó que las pérdidas de ácido ascórbico son algo mayores durante la deshidratación osmótica, a igual temperatura de procesamiento. Por ejemplo, un proceso diseñado para lograr una humedad en la fruta del 200 %b.s. requiere aproximadamente 120, 180 y 90 minutos aplicando DO a 45 °C, secado a 45 y 60 °C respectivamente, en tanto que la retención del ascórbico en dichos procesos está en el orden del 70, 85 y 65 %.

## **Bibliografía**

Agnelli, M.; Marani, C.; Mascheroni, R. 2005. Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits. *Journal of Food Engineering*, 69: 415–424.

Akbaba, H.; Icier, F. 1998. Effect of sugar treatments on freezing of strawberries. *Proceedings of Advances in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain Commissions B2, C2 & D1-3*. Sofia, Bulgarie. *International Institute of Refrigeration*, 6: 570-577

Alzamora, S.M.; Salvatori, D.; Tapia, M.; López-Malo, A.; Welti-Chanes, J. and Fito, P. 2005. Novel functional foods from vegetable matrices impregnated with biologically active compounds. *Journal of Food Engineering*, 67: 205-214.

Bartolome, A.P.; Ruperez, P.; Fuster, C. 1996a. Changes in soluble sugars of two pineapple fruit cultivars during frozen storage. *Food Chemistry*, 56: 163-166.

- Bartolome, A.P.; Ruperez, P.; Fuster, C. 1996b. Freezing Rate and Frozen Storage Effects on Color and Sensory Characteristics of Pineapple Fruit Slices. *Journal of Food Science*, 61: 154–156.
- Bianchi, M.; Milisenda, P.; Guarnaschelli, A.; Abecasis, C.; Mascheroni, R.H. 2008. Modelado y simulación de procesos de congelación y dehidrocongelación de frutas. Publicado en actas del Congreso Americano de Tecnologías de Aire Acondicionado y Refrigeración 2008 (CATAAR 2008); Buenos Aires, 107-122.
- Biswal, R.; Bozorgmehr, K.; Tompkins, F.; Liu, X. 1991. Osmotic concentration of green beans prior to freezing. *Journal of Food Science*, 56: 1008-1012.
- Chiralt, A.; Martínez-Navarrete, N.; Martínez-Monzó, J.; Talens, P.; Moraga, G.; Ayala, A.; Fito, P. 2001. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant effect. *Journal of Food Engineering*, 49: 129-135.
- Choi, Y.; Okos, M.R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In M. Le Maguer & P. Jelen (Eds.), *Food Engineering and Process Applications*, Vol. 1 Transport Phenomena. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Dermesonlouoglou, E.; Giannakourou, M.; Taoukis, P. 2007. Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes. *Journal of Food Engineering*, 78: 272–280.
- Forni, E.; Sormani, A.; Scalise, S.; Torreggiani, D. 1997. The influence of sugar composition on the colour stability of osmodehydrofrozen intermediate moisture apricots. *Food Research International*, 30: 87-94.
- Forni, E.; Torreggiani, D.; Crivelli, G.; Maestrelli, A.; Bertolo, G.; Santelli, F. 1990. Influence of osmosis time on the quality of dehydrofrozen kiwi fruit. *Acta Horticulturae*, 282: 425–434.
- Giannakourou, M.C.; Taoukis, P.S. 2003. Stability of dehydrofrozen green peas pretreated with nonconventional osmotic agents. *Journal of Food Science*, 68: 2002-2010.
- Iciek, J.; Krysiak, W. 2009. Effect of air parameters on the quality of dried potato cubes. *Drying Technology*, 27: 1316-1324.
- Krokida, M.; Maroulis, Z. 2000. Quality changes during drying of food materials. En: *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*; editor: Mujumdar, A.S. Ed. Science Publishers, U.S.
- Krokida, M.K.; Philippopoulos, C. 2005. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology*, 23: 799-830.
- Lewicki, P.; Lukaszuk, A. 2000. Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering*, 45: 119-126.
- Lewicki, P.; Jakubczyk, E. 2004. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, 64: 307–314.
- Li, B.; Sun, D-W. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review. *Journal of Food Engineering*, 54: 175-182.

- Maestrelli, A.; Lo Scalzo, R.; Lupi, D.; Bertolo, G.; Torreggiani, D. 2001. Partial removal of water before freezing: cultivars and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon (*Cucumis melo*, cv *reticulatus* Naud.). *Journal of Food Engineering* 49: 255–260.
- Marani, C.; Agnelli, M.; Mascheroni, R.H. 2007. Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79: 1122–1130.
- Mascheroni, R.H. 1995. Curso de Posgrado Transferencia de Calor en Refrigeración, Congelación y Descongelación de Alimentos. Módulo Propiedades Térmicas, 55 pag. CIDCA, Universidad Nacional de La Plata.
- Moraga, G.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2006. Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing-thawing processes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30: 458–474.
- Nieto, A.; Salvatori, D.; Castro, M.A.; Alzamora, S.M. 1998. Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. *Journal of Food Engineering*, 36: 63-79.
- Nunes, M.H.; Miguel, M.H.; Kieckbusch, T.G. 1996. Influencia dos solutos na conservacao de fatias de manga no processo combinado desidratacao osmotica e congelamento. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (VI ENCIT) e VI Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia (LATCYM 96)*, Florianópolis-SC, Brasil, vol. I: 647-650.
- Robbers, M.; Singh, R.P.; Cunha, L.M. 1997. Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit. *Journal of Food Engineering*, 62:1039-1047.
- Talens, P.; Escriche, I.; Martínez-Navarrete, N.; Chiralt, A. 2002a. Study of the influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of strawberries. *Journal of Food Science*, 67: 1648-1653.
- Talens, P.; Martínez-Navarrete, N.; Fito, P.; Chiralt, A. 2002b. Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3: 191-199.
- Tocci, A.M.; Mascheroni, R.H. 2008. Some thermal properties of fresh and osmotically dehydrated Kiwifruit above and below the initial freezing temperature. *Journal of Food Engineering*, 88: 20–27.
- Torreggiani, D.; Bertolo, G. 2001. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, 49: 247-253.
- Torreggiani, D.; Rondo Broveto, B.; Maestrelli, A.; Bertolo, G. 1999. High quality strawberry ingredients by partial dehydration before freezing. *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration*, Vol. IV, paper 405.
- Torres, J.; Talens, P.; Escriche, I.; Chiralt, A. 2006. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, 74: 240–246.
- Tregunno, N.; Goff, H. 1996. Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects. *Food Research International*, 29: 471-479.

## **Capítulo VI**

### **Conclusiones Generales**

## **Conclusiones**

Las conclusiones generales emanadas del desarrollo del trabajo de tesis son las siguientes:

- El modelo de transferencia de masa propuesto para describir el secado de ananá con aire caliente provee una representación matemática sencilla que tiene en cuenta el encogimiento del material. El modelo es consistente con la teoría de transferencia de masa y su solución numérica fue validada con resultados experimentales, registrándose valores del error promedio porcentual de la estimación en un rango de 4.75 a 9.09 %. Resultados similares fueron observados en la descripción matemática de la cinética de deshidratación osmótica de ananá en solución de sacarosa.
- Los valores de los coeficientes de difusión efectivos del agua durante el secado y durante la deshidratación osmótica están del mismo orden de magnitud, aunque a temperaturas equivalentes la pérdida de agua durante la primera hora de tratamiento es más importante durante el proceso osmótico que durante el secado con aire caliente. La velocidad de deshidratación durante los primeros tiempos (1 h) del proceso osmótico es aproximadamente el doble del valor de la velocidad de deshidratación durante la primera hora de secado con aire, a temperaturas similares. La aplicación de pulsos de vacío no afecta de manera contundente la cinética de deshidratación de ananá. No obstante, la aplicación de pulsos de vacío de 250 mbar mostró un efecto beneficioso sobre la relación pérdida de agua/ganancia de sacarosa al cabo de 5 horas de deshidratación.

- Las medidas de la velocidad de pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de ananá señalan que la temperatura más apropiada para el proceso es 40 °C, ya que a 30 °C la velocidad de deshidratación es marcadamente inferior y a 50 °C los valores de velocidad son aproximadamente iguales que a 40 °C pero con las desventajas adicionales que involucran los procesos a mayor temperatura (mayor insumo energético, mayor pérdida de nutrientes, etc.).

- El *hue* fue el parámetro de color que presentó cambios más significativos y consistentes durante el secado con aire; determinándose una estrecha relación entre este parámetro y el contenido de agua de la fruta de modo independiente de la temperatura del proceso. Estos resultados indican que durante el secado de ananá se producen modificaciones en los valores del tono característico de la fruta.

Por el contrario, este parámetro del color permanece prácticamente sin cambios durante los procesos de deshidratación osmótica. En las condiciones del trabajo, se observó únicamente que se intensifica el color amarillo. El incremento en el amarillo puede ser el resultado de la concentración de los pigmentos en la matriz vegetal junto a la ganancia de sólidos, lo cual se tradujo en un incremento en los valores del *chroma*, relacionado con la intensificación del color de la fruta durante el proceso osmótico.

- Se observó que la pérdida de ácido ascórbico es fuertemente afectada por la temperatura del proceso. Durante la deshidratación osmótica el tiempo necesario para alcanzar determinado valor de  $W/W_0$  es levemente inferior a 50 °C que a 40 °C, sin embargo la retención de ácido ascórbico es considerablemente mayor a 40 °C.

La máxima retención de AA se obtuvo durante el secado a 45 °C. Se observó que las diferencias en los valores del contenido de AA en la fruta fresca ( $C_0$ ) no afectan la cinética de deterioro.

El incremento en la temperatura del proceso de deshidratación, con aire o por ósmosis, disminuye el tiempo al cual el producto con alto contenido de agua es expuesto a altas temperaturas, pero, al mismo tiempo, incrementa la velocidad de degradación del ácido ascórbico. Dentro del rango de las variables del presente estudio se encontró que las condiciones de deshidratación más apropiadas son: 45 °C para el secado con aire y 40 °C para la deshidratación osmótica. En estas condiciones, el tratamiento osmótico

presenta menos pérdida de nutriente para un mismo valor de pérdida de agua durante la primera hora de proceso; este fenómeno se invierte después de las tres horas de deshidratación.

En las muestras de ananá parcialmente deshidratado mediante proceso osmótico, donde la cantidad de exudado es muy importante, los valores de contenido de ácido ascórbico disminuyeron después del proceso de congelación-descongelación.

- El modelo que mejor representa la dependencia de la disminución del espesor con el contenido de agua de la fruta durante el secado es el modelo lineal, estableciéndose que dicho comportamiento es independiente de la temperatura del proceso. La contracción en la dirección radial es tres veces menor que la pérdida de espesor.

La velocidad de variación del espesor durante la deshidratación osmótica fue individualmente estudiada a cada temperatura de proceso (30, 40 y 50 °C). El modelo que mostró mejor ajuste a estos datos para cada temperatura fue un modelo empírico lineal que relaciona el espesor con el logaritmo de la humedad adimensional. La aplicación de pulsos de vacío no influye en la variación del espesor de la fruta durante la deshidratación osmótica.

Los valores del encogimiento, para valores de humedad inferiores a  $W/W_0 = 0.7$ , son mayores durante el secado que durante el proceso de DO.

- La velocidad de rehidratación de rodajas de ananá se incrementa con la temperatura del proceso para las condiciones ensayadas. La rehidratación a 25 °C es independiente de la temperatura de secado, en tanto que a 40 °C presenta relación inversa con la temperatura del pre-tratamiento de secado. Los valores experimentales exhiben un buen ajuste al modelo de Page y el comportamiento antes descrito se refleja en los valores del parámetro  $k$ . En acuerdo con los resultados del análisis de la cinética de rehidratación, los valores del COR indican que el grado de recuperación de humedad del producto disminuye a medida que aumenta la temperatura de secado y muestran poca dependencia con la temperatura de rehidratación, en el rango estudiado.

El COR aumenta con la temperatura del proceso de rehidratación y disminuye con la temperatura del pre-tratamiento de deshidratación osmótica. Los valores medios de este coeficiente estarían indicando una mayor habilidad de hidratación en las muestras de

ananá pre-deshidratadas a 40 °C. Estos resultados son concordantes con las observaciones cinéticas que indican que la capacidad de rehidratación de la fruta pre-deshidratada a 50 °C es inferior que la fruta pre-deshidratada a 40 °C.

Por otra parte, la humedad al final de la rehidratación de las muestras de ananá pre-secadas con aire caliente es, en todos los casos, marcadamente superior a la humedad que alcanzan las muestras pre-deshidratadas con solución de sacarosa. De idéntica forma, los valores de los coeficientes COR y RR indican mayor capacidad de rehidratación en las muestras de ananá pre-secadas con aire respecto de aquellas pre-deshidratadas por ósmosis.

En función a la cinética de deshidratación, a los cambios en el color y a la retención de vitamina C, se consideró que una temperatura de 40 °C proporciona las mejores condiciones para la deshidratación de ananá en solución de sacarosa de 60 °Brix. En estas condiciones se evaluó la aplicación de pulsos de vacío y se prepararon las muestras de ananá para el posterior proceso de congelación.

- Los cambios más importantes en las propiedades mecánicas generados por el procesamiento osmótico radican en un aumento en la deformación a la fractura y en una disminución del módulo de elasticidad de la fruta. Este último es el parámetro que sufre los cambios más drásticos durante el proceso ya que su valor luego de cuatro horas de tratamiento osmótico es tan solo del 26 % del valor inicial y estaría indicando una marcada disminución de la resistencia elástica del sistema. Además, se registró un aumento sistemático en los valores de resistencia a la fractura, lo que estaría indicando un incremento en la firmeza de los trozos de fruta durante la deshidratación osmótica.

La aplicación de pulsos de vacío aumenta la resistencia a la fractura y favorece la pérdida de turgencia en los primeros tiempos del proceso de deshidratación. Estos efectos son más drásticos con pulsos de vacío de 250 mbar que con pulsos de 100 mbar. La diferencia de respuesta del sistema a pulsos de 15 y 25 minutos de duración no es clara.

El secado con aire caliente provoca cambios en las propiedades mecánicas del ananá en la misma dirección que el proceso osmótico, aunque con mayor intensidad. Las temperaturas de secado más bajas inducen los cambios más drásticos en los valores de

resistencia a la fractura, para un mismo valor de humedad en el producto final. Se registró efecto equivalente de ambos procesos, secado y deshidratación osmótica, sobre las variaciones en los valores del módulo de elasticidad y de la deformación a la fractura.

- Aún cuando los procesos de deshidratación de ananá originan una estructura celular igual o más resistente que la fruta fresca, el posterior proceso de congelación-descongelación de las mismas causa pérdida de firmeza y una marcada disminución de la resistencia a la ruptura, lo que se registró como una caída en los valores de tensión de fractura y aumento en la deformación a la fractura.
- Tanto la deshidratación osmótica como el secado, aplicados en una etapa previa a la congelación, tienen el beneficioso efecto de disminuir el tiempo necesario para la congelación de rodajas de ananá.
- Las pérdidas por exudado disminuyeron con pre-tratamientos de deshidratación osmótica de más de una hora; tiempos de inmersión breves (hasta una hora) generan un incremento en las pérdidas de líquidos durante la descongelación. Asimismo, la deshidratación con aire caliente como pre-tratamiento del proceso de congelación, reduce significativamente el volumen de exudado durante la descongelación del producto.

*En resumen, se puede concluir que tres horas de secado de ananá en corriente de aire a 45 °C es el proceso de deshidratación parcial más apropiado, de los ensayados en la presente investigación, previo a la etapa de congelación del producto. Este pre-tratamiento permite obtener un producto de excelentes características nutricionales (elevada retención de ácido L-ascórbico) y funcionales (buena respuesta a la rehidratación), disminuye los tiempos de congelación y las pérdidas por exudado, otorgando a la fruta propiedades mecánicas aceptables aún después del proceso de congelación-descongelación.*